

10/812,887

日 本 国 特 許 庁  
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されて  
る事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed  
with this Office.

出 願 年 月 日                      2 0 0 4 年    3 月    3 日  
Date of Application:

願 番 号                      特 願 2 0 0 4 - 0 5 9 7 4 2  
Application Number:

T. 10/C] :                      [ J P 2 0 0 4 - 0 5 9 7 4 2 ]

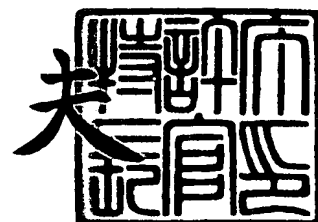
願                      人                      T D K 株 式 会 社  
Applicant(s):

BEST AVAILABLE COPY

2 0 0 4 年    4 月    6 日

特 許 庁 長 官  
Commissioner,  
Japan Patent Office

今 井 康 夫



CERTIFIED COPY OF  
PRIORITY DOCUMENT

出 証 番 号    出 証 特 2 0 0 4 - 3 0 2 8 0 9 0

【書類名】 特許願  
【整理番号】 99P07166  
【あて先】 特許庁長官殿  
【国際特許分類】 G01R 27/06  
【発明者】  
    【住所又は居所】 東京都中央区日本橋一丁目 1 3 番 1 号 T D K株式会社内  
    【氏名】 江畑 克史  
【特許出願人】  
    【識別番号】 000003067  
    【氏名又は名称】 T D K株式会社  
    【代表者】 澤部 肇  
【代理人】  
    【識別番号】 100116182  
    【弁理士】  
    【氏名又は名称】 内藤 照雄  
【選任した代理人】  
    【識別番号】 100099195  
    【弁理士】  
    【氏名又は名称】 宮越 典明  
【先の出願に基づく優先権主張】  
    【出願番号】 特願2003- 96424  
    【出願日】 平成15年 3月31日  
【先の出願に基づく優先権主張】  
    【出願番号】 特願2003-283591  
    【出願日】 平成15年 7月31日  
【先の出願に基づく優先権主張】  
    【出願番号】 特願2003-283592  
    【出願日】 平成15年 7月31日  
【先の出願に基づく優先権主張】  
    【出願番号】 特願2003-283593  
    【出願日】 平成15年 7月31日  
【手数料の表示】  
    【予納台帳番号】 110804  
    【納付金額】 21,000円  
【提出物件の目録】  
    【物件名】 特許請求の範囲 1  
    【物件名】 明細書 1  
    【物件名】 図面 1  
    【物件名】 要約書 1

**【書類名】 特許請求の範囲****【請求項 1】**

モード発生器内に誘電体を封入する封入工程と、  
前記モード発生器に電磁波を入力する入力工程と、  
前記モード発生器から出力される電磁波を測定する測定工程と、  
測定された前記電磁波を基に複素誘電率を算出する算出工程と、を備えたことを特徴とする誘電体の複素誘電率の測定方法。

**【請求項 2】**

前記誘電体は粉体状の誘電体であって、  
前記モード発生器内には、前記誘電体とともに気体が封入され、  
前記測定工程は、前記電磁波の S パラメータを測定し、  
前記算出工程は、前記 S パラメータを基に、前記モード発生器内の前記誘電体と前記気体とが混合した混合体の複素誘電率を算出する工程と、  
算出された前記混合体の複素誘電率および前記混合体中の前記誘電体の体積比率から、前記誘電体の複素誘電率を算出する工程と、を備えたことを特徴とする請求項 1 に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。

**【請求項 3】**

前記混合体の複素誘電率の算出が前記混合体の比誘電率の算出であり、前記誘電体の複素誘電率の算出が、前記誘電体の比誘電率の算出であることを特徴とする請求項 2 に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。

**【請求項 4】**

前記誘電体の比誘電率が、対数混合則、リヒトネッカロータの式およびウイナーの式のいずれか一つの式を用いて算出されることを特徴とする請求項 3 に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。

**【請求項 5】**

前記混合体の複素誘電率の算出が前記混合体の誘電正接の算出であり、前記誘電体の複素誘電率の算出が前記誘電体の誘電正接の算出であることを特徴とする請求項 2 ～ 4 のいずれか 1 項に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。

**【請求項 6】**

前記誘電体の誘電正接の算出が、混合則の式を用いて行われることを特徴とする請求項 5 に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。

**【請求項 7】**

前記誘電体は前記モード発生器の閉空間の断面と同一の断面を有する誘電体の成形物であって、

前記モード発生器内には、前記誘電体とともに気体が封入され、  
前記測定工程は、前記電磁波の共振モードにおける共振周波数、挿入損失および電力半値幅を測定し、

前記算出工程は、測定された前記共振周波数、前記挿入損失および前記電力半値幅から、前記誘電体の成形物の複素誘電率を算出することを特徴とする請求項 1 に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。

**【請求項 8】**

前記誘電体の成形物の複素誘電率の算出が、前記誘電体の成形物の比誘電率の算出であることを特徴とする請求項 7 に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。

**【請求項 9】**

前記誘電体の成形物の複素誘電率の算出が前記誘電体の成形物の誘電正接の算出であることを特徴とする請求項 7 に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。

**【請求項 10】**

前記誘電体の成形物が、柱状であることを特徴とする請求項 7 ～ 9 の何れか 1 項に記載の粉体状の誘電体の複素誘電率の測定方法。

**【請求項 11】**

前記モード発生器が、円筒型の共振器であることを特徴とする請求項 2～10 の何れか 1 項に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。

【請求項 12】

前記モード発生器が、空洞共振器であることを特徴とする請求項 2～10 の何れか 1 項に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。

【請求項 13】

前記電磁波の共振モードが、 $TE_{011}$ モードであることを特徴とする請求項 2～12 の何れか 1 項に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。

【請求項 14】

前記モード発生器内で前記誘電体を乾燥させる工程を備えたことを特徴とする請求項 1～13 のいずれか 1 項に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。

【請求項 15】

前記モード発生器を真空引きすることにより前記誘電体を乾燥させる工程を備えたことを特徴とする請求項 14 に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。

【請求項 16】

前記モード発生器は導波管であって、  
前記導波管内には、前記誘電体とともに気体または液体が封入され、  
前記算出工程は、測定された前記電磁波を基に、前記粉体と気体または液体とからなる混合体の比誘電率を算出し、  
前記算出工程は、前記混合体の比誘電率と前記混合体における前記粉体の体積比率とから前記粉体の比誘電率を算出することを特徴とする請求項 1 に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。

【請求項 17】

前記誘電体の比誘電率が、対数混合則、リヒトネッカロータの式およびウイナーの式のいずれか一つの式を用いて算出されることを特徴とする請求項 16 に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。

【請求項 18】

前記導波管は、同軸型の導波管であることを特徴とする請求項 16 または 17 に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。

【請求項 19】

前記導波管は、方形型の導波管であることを特徴とする請求項 16 または 17 に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。

【請求項 20】

前記導波管は、円形型の導波管であることを特徴とする請求項 16 または 17 に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。

【請求項 21】

前記導波管は、前記気体または前記液体を保持するシール部を備えたことを特徴とする請求項 16～20 のいずれか 1 項に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。

【請求項 22】

前記混合体における前記粉体の体積比率が 0.32～0.42 に設定されるとともに、前記電磁波の周波数が 0.1 GHz 以上であることを特徴とする請求項 16～21 のいずれか 1 項に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。

【請求項 23】

それぞれ粉体の種類が異なり且つ体積比率が同一である複数の混合体のそれぞれの比誘電率を測定する工程と、

前記複数の混合体の比誘電率の大きさを比較することにより、複数の誘電体の比誘電率を比較測定する工程と、を備えたことを特徴とする請求項 17 に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。

【請求項 24】

誘電体が内部に配置されるモード発生器と、

前記誘電体が配置された前記モード発生器に電磁波を入力し、前記電磁波の入力に応答して前記モード発生器から出力された前記電磁波を測定する電磁波生成解析器と、

測定された前記電磁波を基に、前記誘電体の複素誘電率を算出する演算処理装置と、を備えていることを特徴とする誘電体の複素誘電率の測定装置。

【請求項 25】

前記モード発生器は、前記誘電体および気体を封入するための共振器であり、前記電磁波生成解析器は、前記電磁波の共振モードにおける共振周波数、挿入損失および電力半値幅を測定し、

前記演算処理装置は、前記共振周波数、前記挿入損失および前記電力半値幅を基に、前記誘電体の複素誘電率を算出することを特徴とする請求項 24 に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

【請求項 26】

前記共振器が、

貫通孔を備えた第一のピストンと、

前記第一のピストンと対向配置された第二のピストンと、

前記第一のピストン及び前記第二のピストンを覆うことにより閉空間を形成するシリンダと、

前記貫通孔に挿入された前記電磁波入力及び出力用の同軸ケーブルと、を備えていることを特徴とする請求項 25 に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

【請求項 27】

前記第一のピストン先端部または前記第二のピストンの先端部には、円環状の溝が形成されていることを特徴とする請求項 26 に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

【請求項 28】

前記第一のピストン先端部または前記第二のピストンの先端部には、円環状の導体板または誘電体板が取り付けられていることを特徴とする請求項 26 に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

【請求項 29】

前記演算処理装置が、前記誘電体が粉体状である場合、測定された前記共振周波数、前記挿入損失および前記電力半値幅から、前記共振器内の前記誘電体と前記気体とが混合した混合体の複素誘電率を算出し、算出された前記混合体の複素誘電率および前記混合体中の前記誘電体の体積比率から、前記誘電体の複素誘電率を算出することを特徴とする請求項 25 ～ 28 の何れか 1 項に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

【請求項 30】

前記混合体の複素誘電率の算出が、前記混合体の比誘電率の算出であり、前記誘電体の複素誘電率の算出が、前記誘電体の比誘電率の算出であることを特徴とする請求項 29 に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

【請求項 31】

前記誘電体の比誘電率が、対数混合則、リヒトネッカロータの式およびウイナーの式のいずれかの式を用いて算出されることを特徴とする請求項 30 に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

【請求項 32】

前記混合体の複素誘電率の算出が、前記混合体の誘電正接の算出であり、前記誘電体の複素誘電率の算出が、前記誘電体の誘電正接の算出であることを特徴とする請求項 29 に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

【請求項 33】

前記誘電体の誘電正接が、混合則の式を用いて算出されることを特徴とする請求項 32 に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

【請求項 34】

前記演算処理装置が、前記柱状の誘電体が成形物である場合、測定された前記共振周波数、前記挿入損失および前記電力半値幅から、前記誘電体の成形物の複素誘電率を算出す

ること特徴とする請求項 25～28 のいずれか 1 項に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

【請求項 35】

前記誘電体の成形物の複素誘電率の算出が、前記誘電体の成形物の比誘電率の算出であることを特徴とする請求項 34 に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

【請求項 36】

前記誘電体の成形物の複素誘電率の算出が、前記誘電体の成形物の誘電正接の算出であることを特徴とする請求項 34 に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

【請求項 37】

前記電磁波の共振モードが、 $TE_{011}$ モードであることを特徴とする請求項 25～36 のいずれか 1 項に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

【請求項 38】

前記共振器内の閉空間を真空引きして、前記共振器内の前記誘電体を乾燥させる真空装置を備えたことを特徴とする請求項 25～37 のいずれか 1 項に記載の粉体状の誘電体の複素誘電率の測定方法。

【請求項 39】

前記共振器内に、前記閉空間の断面と同一の断面を有する柱状の誘電体の成形物および気体を封入することを特徴とする請求項 34～36 のいずれか 1 項に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

【請求項 40】

誘電体および気体を、前記共振器内に形成された断面が略円形の閉空間内に封入することを特徴とする請求項 25～39 のいずれか 1 項に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

【請求項 41】

前記モード生成器は、複素誘電率を測定すべき粉体と、気体または液体とからなる混合体を内部に充填する導波管であることを特徴とする請求項 24 に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

## 【書類名】明細書

【発明の名称】誘電体の複素誘電率の測定方法及び測定装置

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、誘電体の複素誘電率の測定方法及び測定装置に関するものであり、さらに詳細には、誘電体の複素誘電率を高い精度で測定することができる誘電体の複素誘電率の測定方法及び測定装置に関するものである。

## 【背景技術】

## 【0002】

各種無線装置の高性能化に伴い、数GHz以上の高周波帯域において高い性能を有する高周波用のセラミックス誘電体が求められている。一般に、セラミックス誘電体は、粉体状の誘電体を焼成した焼成品の形で回路部品として用いられている。また、粉体状の誘電体と樹脂などを種々の比率で混合した複合誘電体も、回路部品として用いられている。

## 【0003】

したがって、高周波用のセラミックス誘電体を開発するにあたっては、誘電体の誘電特性として、誘電体の複素誘電率を、粉体、焼成品等の状態に応じて測定することが必要不可欠になる。

## 【0004】

粉体状の誘電体の複素誘電率のうち比誘電率は、たとえば、一定の間隔を置いて、対向するように、一對の電極が配置された容器内に、比誘電率を測定すべき粉体状の誘電体を封入し、一對の電極間に、電圧を印加して、粉体状の誘電体と空気との混合体の比誘電率を測定し、測定された混合体の比誘電率から算出されていた（特許文献1参照）。

## 【0005】

一方、粉体状の誘電体を焼成等により成形した誘電体の成形物の複素誘電率の測定は、一般には、摂動法や空洞共振器法および誘電体共振器法を用いて行われている（非特許文献1, 2, 3参照）。摂動法や空洞共振器法および誘電体共振器法では、測定対象となる誘電体の成形物が、それぞれの測定方法で定められた所定の形状であることが必要である。例えば、摂動法では細長い棒状に、空洞共振器法ではシート状に、誘電体共振器法では円柱状に、測定対象となる誘電体が成形されている必要がある。

## 【0006】

【特許文献1】特開平6-138076号公報

【非特許文献1】飯島康、「Electronic Monthly」、新光商事株式会社、1998年7月

【非特許文献2】JIS R 1627:1996 「マイクロ波用ファインセラミックスの誘電特性の試験方法」、日本規格協会、1996年7月

【非特許文献3】JIS R 1641:2002 「ファインセラミックス基板のマイクロ波誘電特性の試験方法」、日本規格協会、2002年1月

## 【発明の開示】

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【0007】

しかしながら、従来の粉体状の誘電体の比誘電率の測定方法においては、数GHz以上の高周波帯域において、粉体状の誘電体の比誘電率を測定する場合には、浮遊容量や浮遊リアクタンスの存在が無理できなくなり、その結果、測定装置全体が共振し、高い精度で、粉体状の誘電体の比誘電率を測定できないという問題があった。また、従来は、粉体状の誘電体の複素誘電率のうち誘電正接を、所望のように、測定する実用的な方法は知られていなかった。

## 【0008】

一方、誘電体の成形物については、誘電体の種類によっては、誘電体の成形物を円柱状に成形することは容易であるが、細長い棒状や板状に成形するのが困難であり、摂動法や空洞共振器法を用いて誘電体の複素誘電率を測定することができないという問題があった

。一方、円柱状の誘電体の成形物を測定することが可能な誘電体共振器法では、複素誘電率のうち比誘電率が低い誘電体、たとえば、樹脂などについては、誘電体の比誘電率および誘電正接を測定できないという問題があった。

【0009】

本発明は、上記事情を鑑み、数GHz以上の高周波帯域においても、高い精度で、粉体状の誘電体または誘電体の成形物の複素誘電率を測定可能な粉体状の誘電体または誘電体の成形物の複素誘電率の測定方法及び測定装置を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0010】

- (1) モード発生器内に誘電体を封入する封入工程と、  
前記モード発生器に電磁波を入力する入力工程と、  
前記モード発生器から出力される電磁波を測定する測定工程と、  
測定された前記電磁波を基に複素誘電率を算出する算出工程と、を備えたことを特徴とする誘電体の複素誘電率の測定方法。
- (2) 前記誘電体は粉体状の誘電体であって、  
前記モード発生器内には、前記誘電体とともに気体が封入され、  
前記測定工程は、前記電磁波の共振モードにおけるSパラメータを測定し、  
前記算出工程は、前記Sパラメータを基に、前記モード発生器内の前記誘電体と前記気体とが混合した混合体の複素誘電率を算出する工程と、  
算出された前記混合体の複素誘電率および前記混合体中の前記誘電体の体積比率から、前記誘電体の複素誘電率を算出する工程と、を備えたことを特徴とする(1)に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。
- (3) 前記混合体の複素誘電率の算出が前記混合体の比誘電率の算出であり、前記誘電体の複素誘電率の算出が、前記誘電体の比誘電率の算出であることを特徴とする(2)に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。
- (4) 前記誘電体の比誘電率が、対数混合則、リヒトネッカロータの式およびウイナーの式のいずれか一つの式を用いて算出されることを特徴とする(3)に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。
- (5) 前記混合体の複素誘電率の算出が前記混合体の誘電正接の算出であり、前記誘電体の複素誘電率の算出が前記誘電体の誘電正接の算出であることを特徴とする(2)～(4)のいずれか1項に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。
- (6) 前記誘電体の誘電正接の算出が、混合則の式を用いて行われることを特徴とする(5)に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。
- (7) 前記誘電体は前記モード発生器の閉空間の断面と同一の断面を有する誘電体の成形物であって、  
前記モード発生器内には、前記誘電体とともに気体が封入され、  
前記測定工程は、前記電磁波の共振モードにおける共振周波数、挿入損失および電力半値幅を測定し、  
前記算出工程は、測定された前記共振周波数、前記挿入損失および前記電力半値幅から、前記誘電体の成形物の複素誘電率を算出することを特徴とする(1)に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。
- (8) 前記誘電体の成形物の複素誘電率の算出が、前記誘電体の成形物の比誘電率の算出であることを特徴とする(7)に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。
- (9) 前記誘電体の成形物の複素誘電率の算出が前記誘電体の成形物の誘電正接の算出であることを特徴とする(7)に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。
- (10) 前記誘電体の成形物が、柱状であることを特徴とする(7)～(9)の何れか1項に記載の粉体状の誘電体の複素誘電率の測定方法。
- (11) 前記モード発生器が、円筒型の共振器であることを特徴とする(2)～(10)の何れか1項に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。
- (12) 前記モード発生器が、空洞共振器であることを特徴とする(2)～(10)の



何れか 1 項に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。

(13) 前記電磁波の共振モードが、 $TE_{011}$ モードであることを特徴とする (2) ~ (12) の何れか 1 項に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。

(14) 前記モード発生器内で前記誘電体を乾燥させる工程を備えたことを特徴とする (1) ~ (13) のいずれか 1 項に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。

(15) 前記モード発生器内を真空引きすることにより前記誘電体を乾燥させる工程を備えたことを特徴とする (14) に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。

(16) 前記モード発生器は導波管であって、  
前記導波管内には、前記誘電体とともに気体または液体が封入され、  
前記算出工程は、測定された前記電磁波を基に、前記粉体と気体または液体とからなる混合体の比誘電率を算出し、  
前記算出工程は、前記混合体の比誘電率と前記混合体における前記粉体の体積比率とから前記粉体の比誘電率を算出することを特徴とする (1) に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。

(17) 前記誘電体の比誘電率が、対数混合則、リヒトネッカロータの式およびウイナーの式のいずれか一つの式を用いて算出されることを特徴とする (16) に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。

(18) 前記導波管は、同軸型の導波管であることを特徴とする (16) または (17) に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。

(19) 前記導波管は、方形型の導波管であることを特徴とする (16) または (17) に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。

(20) 前記導波管は、円形型の導波管であることを特徴とする (16) または (17) に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。

(21) 前記導波管は、前記気体または前記液体を保持するシール部を備えたことを特徴とする (16) ~ (20) のいずれか 1 項に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。

(22) 前記混合体における前記粉体の体積比率が 0.32 ~ 0.42 に設定されるとともに、前記電磁波の周波数が 0.1 GHz 以上であることを特徴とする (16) ~ (21) のいずれか 1 項に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。

(23) それぞれ粉体の種類が異なり且つ体積比率が同一である複数の混合体のそれぞれの比誘電率を測定する工程と、  
前記複数の混合体の比誘電率の大きさを比較することにより、複数の誘電体の比誘電率を比較測定する工程と、を備えたことを特徴とする (17) に記載の誘電体の複素誘電率の測定方法。

(24) 誘電体が内部に配置されるモード発生器と、  
前記誘電体が配置された前記モード発生器に電磁波を入力し、前記電磁波の入力に応答して前記モード発生器から出力された前記電磁波を測定する電磁波生成解析器と、  
測定された前記電磁波を基に、前記誘電体の複素誘電率を算出する演算処理装置と、を備えていることを特徴とする誘電体の複素誘電率の測定装置。

(25) 前記モード発生器は、前記誘電体および気体を封入するための共振器であり、  
前記電磁波生成解析器は、前記電磁波の共振モードにおける共振周波数、挿入損失および電力半値幅を測定し、  
前記演算処理装置は、前記共振周波数、前記挿入損失および前記電力半値幅を基に、前記誘電体の複素誘電率を算出することを特徴とする (24) に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

(26) 前記共振器が、  
貫通孔を備えた第一のピストンと、  
前記第一のピストンと対向配置された第二のピストンと、  
前記第一のピストン及び前記第二のピストンを覆うことにより閉空間を形成するシリンダと、  
前記貫通孔に挿入された前記電磁波入力及び出力用の同軸ケーブルと、を備えていること

を特徴とする(25)に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

(27) 前記第一のピストン先端部または前記第二のピストンの先端部には、円環状の溝が形成されていることを特徴とする(26)に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

(28) 前記第一のピストン先端部または前記第二のピストンの先端部には、円環状の導体板または誘電体板が取り付けられていることを特徴とする(26)に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

(29) 前記演算処理装置が、前記誘電体が粉体状である場合、測定された前記共振周波数、前記挿入損失および前記電力半値幅から、前記共振器内の前記誘電体と前記気体とが混合した混合体の複素誘電率を算出し、算出された前記混合体の複素誘電率および前記混合体中の前記誘電体の体積比率から、前記誘電体の複素誘電率を算出することを特徴とする(25)～(28)の何れか1項に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

(30) 前記混合体の複素誘電率の算出が、前記混合体の比誘電率の算出であり、前記誘電体の複素誘電率の算出が、前記誘電体の比誘電率の算出であることを特徴とする(29)に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

(31) 前記誘電体の比誘電率が、対数混合則、リヒトネッカロータの式およびウイナーの式のいずれかの式を用いて算出されることを特徴とする(30)に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

(32) 前記混合体の複素誘電率の算出が、前記混合体の誘電正接の算出であり、前記誘電体の複素誘電率の算出が、前記誘電体の誘電正接の算出であることを特徴とする(29)に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

(33) 前記誘電体の誘電正接が、混合則の式を用いて算出されることを特徴とする(32)に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

(34) 前記演算処理装置が、前記柱状の誘電体が成形物である場合、測定された前記共振周波数、前記挿入損失および前記電力半値幅から、前記誘電体の成形物の複素誘電率を算出すること特徴とする(25)～(28)のいずれか1項に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

(35) 前記誘電体の成形物の複素誘電率の算出が、前記誘電体の成形物の比誘電率の算出であることを特徴とする(34)に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

(36) 前記誘電体の成形物の複素誘電率の算出が、前記誘電体の成形物の誘電正接の算出であることを特徴とする(34)に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

(37) 前記電磁波の共振モードが、TE<sub>011</sub>モードであることを特徴とする(25)～(36)のいずれか1項に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

(38) 前記共振器内の閉空間を真空引きして、前記共振器内の前記誘電体を乾燥させる真空装置を備えたことを特徴とする(25)～(37)のいずれか1項に記載の粉体状の誘電体の複素誘電率の測定方法。

(39) 前記共振器内に、前記閉空間の断面と同一の断面を有する柱状の誘電体の成形物および気体を封入することを特徴とする(34)～(36)のいずれか1項に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

(40) 誘電体および気体を、前記共振器内に形成された断面が略円形の閉空間内に封入することを特徴とする(25)～(39)のいずれか1項に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

(41) 前記モード生成器は、複素誘電率を測定すべき粉体と、気体または液体とからなる混合体を内部に充填する導波管であることを特徴とする(24)に記載の誘電体の複素誘電率の測定装置。

#### 【発明の効果】

#### 【0011】

本発明によれば、数GHz以上の高周波帯域においても、高い精度で、粉体状の誘電体の複素誘電率を測定することができる誘電体の複素誘電率の測定方法及び測定装置を提供することが可能になる。

#### 【発明を実施するための最良の形態】

## 【0012】

以下、添付図面に基づいて、本発明の好ましい実施形態につき、詳細に説明を加える。

## 【0013】

まず、詳細な実施形態の説明に入る前に、本発明に係る誘電体の複素誘電率の測定方法の基本的な原理について大まかに説明する。なお、以下の説明において、“粉体状の誘電体の複素誘電率”は、誘電体の比誘電率および誘電体の誘電正接を意味するものとする。

## 【0014】

図1は、本発明に係る誘電体の複素誘電率の測定装置の概略構成を示すブロック図である。

## 【0015】

図1に示されるように、測定装置1は、モード発生器2、電磁波生成解析器3及び演算処理装置4によって構成されている。

## 【0016】

モード発生器2は、複素誘電率を測定すべき誘電体を気体とともに保持する容器である。このモード発生器2は、入力される電磁波に対し所定のモードの波のみを存在可能とするものであり、例えば共振器や導波管を用いることが可能である。ここで、モード発生器2内に封入される誘電体は、粉体状の誘電体、粉体の誘電体を焼成することにより成形された単一の素材からなる成形物、粉体状の誘電体と樹脂などを種々の比率で混合して成形した複数の素材からなる成形物等が考えられる。

## 【0017】

電磁波生成解析器3は、モード発生器2内に電磁波を入力するとともに、入力された電磁波に応答してモード発生器2から出力される電磁波を受信する。そして、電磁波生成解析器3は、この受信した電磁波を解析することによって、モード発生器2内の電磁波のSパラメータを算出し、そして算出されたSパラメータのデータを演算処理装置4に出力する。ここで、電磁波のSパラメータとは、電磁波の透過係数及び反射係数を指す。

## 【0018】

演算処理装置4は、電磁波生成解析器3から入力されたSパラメータを基に、誘電体の複素誘電率を算出する。

モード発生器2内に配置された誘電体が成形物ではなく、粉体状である場合には、演算処理装置4は、粉体状の誘電体の複素誘電率を直接算出することはできず、まず粉体状の誘電体と空気の混合物の複素誘電率を求め、そしてリヒトネッカロータの式やウイナーの式等を用いて粉体状の誘電体だけの複素誘電率を求める。

## 【0019】

このように、本発明に係る誘電体の複素誘電率の測定装置では、モード発生器2内に電磁波を入力し、出力される電磁波を基に解析を行うことによって、粉体状または成形物である誘電体の複素誘電率を測定するように構成されている。

## 【0020】

以下、より具体的な測定装置の構造を説明していきながら、誘電体の複素誘電率の測定方法について説明を行う。

## 【0021】

## (第1実施形態)

以下、本発明に係る誘電体の複素誘電率の測定装置及び測定方法の第1実施形態について、詳細に説明する。本実施形態は、図1に示すモード発生器として空洞共振器を用いた例である。

## 【0022】

図2は、本実施形態の誘電体の複素誘電率の測定方法を実施する測定装置のブロック図であり、図3は、空洞共振器の略斜視図であり、図4は、図3に示された空洞共振器のX-X線に沿った略断面図であり、誘電体として粉体状の誘電体が表示されている。

## 【0023】

図2に示されるように、測定装置12は、空洞共振器14とネットワークアナライザ1

6と演算処理装置18を備えており、順に図1のモード発生器2、電磁波生成解析器3及び演算処理装置4にそれぞれ対応している。すなわち、本実施形態の測定装置12は、モード発生器2として空洞共振器14を適用している。

【0024】

空洞共振器14は、複素誘電率を測定すべき誘電体を封入するための円筒状の金属製容器である。この空洞共振器14内に、電磁波が入力されると、空洞共振器14の形状に応じた共鳴により所定モードの電磁波が強く観測される。

【0025】

ネットワークアナライザ16は、空洞共振器14内に電磁波を入力し、電磁波の入力に応答して、空洞共振器14から出力された電磁波を受け取る。そして、空洞共振器14から受けた電磁波から、所定モードの電磁波の共振周波数、挿入損失および電力半値幅を測定して、測定結果を演算処理装置18に出力する。

【0026】

演算処理装置18は、ネットワークアナライザ16から入力された共振周波数、挿入損失および電力半値幅から、誘電体の複素誘電率を算出するように構成されている。

【0027】

図3に示されるように、空洞共振器14は、シリンダ114、第一のピストン120、同軸ケーブル122、ねじ134a、134bおよび第二のピストン140を備えている。

【0028】

図4に示されるように、第一のピストン120は、第一の円板126と、第一の円板126の中心に一体に立設された第一の円柱体128を有している。第一の円板126および第一の円柱体128には、第一の円柱体128の軸方向に沿って2つの貫通孔130a、130bが形成されている。また、第一の円柱体128の先端部の周縁部分には、円環状の溝132が形成されている。

【0029】

図4に示されるように、同軸ケーブル122は、第一の円板126および第一の円柱体128に形成された2つの貫通孔130a、130b内に挿入され、同軸ケーブル122の先端部には、ループアンテナ124が取り付けられている。

【0030】

図4に示されるように、第二のピストン140は、第二の円板142と、第二の円板142の中心に一体に立設された第二の円柱体144を有している。ここで、第二の円柱体144の外径は、第一の円柱体128の外径と等しい。

【0031】

図4に示されるように、シリンダ114の中央部には、第一のピストン120の第一の円柱体128の外径および第二のピストン140の第二の円柱体144の外径に略等しい内径を有する貫通孔116が形成されている。この貫通孔116内には、上方から第一のピストン120の第一の円柱体128が挿入され、下方から第二のピストン140の第二の円柱体144が挿入され、シリンダ114の貫通孔116内には、第一のピストン120の第一の円柱体128と、第二のピストン140の第二の円柱体144とによって、閉空間109が形成されている。この閉空間109は、空洞共振器14の共鳴空洞となる領域であり、ここに測定すべき粉体状の誘電体または誘電体の成形物が気体とともに封入される。

【0032】

また、シリンダ114には、シリンダ114の軸方向に略直交する2つの貫通孔136a、136bが形成されており、貫通孔136a内には、第一のピストン120の第一の円柱体128の位置を調整するねじ134aが挿入され、貫通孔136b内には、第二のピストン140の第二の円柱体144の位置を調整するねじ134bが挿入されている。

【0033】

以上のように構成された測定装置12においては、以下のようにして、粉体状の誘電体

の複素誘電率が測定される。

#### 【0034】

(粉体状の誘電体の複素誘電率測定)

まず、主として図4を参照しながら、粉体状の誘電体の複素誘電率の測定について説明する。

粉体状の誘電体の複素誘電率を測定するにあたっては、まず、空気やアルゴンガスや窒素ガスなどの気体が、空洞共振器14内に形成された閉空間内に封入される。この状態で、ネットワークアナライザ16は、同軸ケーブル122およびループアンテナ124を介して、電磁波を空洞共振器14内に出力する。

#### 【0035】

空洞共振器14は、電磁波の入力に応答して、所定のモードの電磁波を励起させる。この励起した電磁波は、ループアンテナ124によって受信される。ループアンテナ124によって受信された電磁波は、同軸ケーブル122を介して、ネットワークアナライザ16に入力される。

#### 【0036】

ネットワークアナライザ16は、空洞共振器14から出力された電磁波を基に、空洞共振器14内での共振モードである $TE_{011}$ モードでの共振周波数 $f_1$ 、共振周波数 $f_1$ における挿入損失 $IL_1$ および電力半値幅 $\Delta f_1$ 、ならびに $TE_{012}$ モードでの共振周波数 $f_2$ が測定される。

#### 【0037】

一般に、空洞共振器14に、ネットワークアナライザ16から、電磁波を入力したときは、 $TE_{011}$ モードに対する縮退モードとして、 $TM_{111}$ モードが存在する。この $TM_{111}$ モードの共振周波数は、 $TE_{011}$ モードでの共振周波数と非常に近い周波数帯であるため測定された周波数スペクトル上では2つのピークが重なり合ってしまう、 $TE_{011}$ モードでの共振周波数、挿入損失および電力半値幅を正確に測定できないという問題がある。

#### 【0038】

しかし、本実施形態では、この問題を解決するために、第一のピストン120の第一の円柱体128の先端部に円環状の溝132が形成されており、また閉空間109内には空気やアルゴンガスや窒素ガスなどの気体が封入されている。これらにより、空洞共振器14内における $TE_{011}$ モードでの共振周波数と $TM_{111}$ モードでの共振周波数が分離され、この共振周波数の分離により $TE_{011}$ モードでの共振周波数が正確に測定される。

#### 【0039】

ネットワークアナライザ16は、測定した $TE_{011}$ モードでの共振周波数 $f_1$ 、共振周波数 $f_1$ における挿入損失 $IL_1$ および電力半値幅 $\Delta f_1$ 、ならびに $TE_{012}$ モードでの共振周波数 $f_2$ を演算処理装置18に出力する。

#### 【0040】

ネットワークアナライザ16が $TE_{011}$ モードでの共振周波数 $f_1$ 、共振周波数 $f_1$ における挿入損失 $IL_1$ および電力半値幅 $\Delta f_1$ 、ならびに $TE_{012}$ モードでの共振周波数 $f_2$ を演算処理装置18に出力すると、複素誘電率を測定すべき粉体状の誘電体110が、空洞共振器14の閉空間内に封入される。

#### 【0041】

ここに、測定すべき粉体状の誘電体110は、予め、真空中に置き、または加熱等を行い、誘電体110に含まれる水分を除去することにより、乾燥されていることが好ましい。

一般に、粉体状の誘電体110の複素誘電率の測定においては、粉体状の誘電体110の表面に吸着した水分の影響により、粉体状の誘電体110の複素誘電率の測定に誤差が生じるという問題がある。しかし、上記構成においては、測定すべき粉体状の誘電体110の水分を予め除去した後に、粉体状の誘電体110の複素誘電率を測定するように構成しているので、粉体状の誘電体110の複素誘電率の測定の精度を高めることができる。

#### 【0042】

粉体状の誘電体 110 が空洞共振器 14 の閉空間内に封入されると、図 4 に示されるように、空洞共振器 14 の閉空間内に、空気やアルゴンガスや窒素ガスなどの気体の層 112 と、粉体状の誘電体 110 と気体とが混合した混合体の層 118 が形成される。

#### 【0043】

次いで、ネットワークアナライザ 16 は、複素誘電率を測定すべき粉体状の誘電体 110 が封入された空洞共振器 14 に、同軸ケーブル 122 およびループアンテナ 124 を介して電磁波を出力する。

#### 【0044】

ネットワークアナライザ 16 が空洞共振器 14 内に電磁波を入力すると、電磁波の入力に 응답して、空洞共振器 14 から電磁波が出力され、ループアンテナ 124 によって受信される。ループアンテナ 124 によって受信された電磁波は、同軸ケーブル 122 を介して、ネットワークアナライザ 16 に入力される。

#### 【0045】

ネットワークアナライザ 16 は、入力された電磁波を解析して、共振モードのうちの  $TE_{011}$  モードでの共振周波数  $f_3$ 、共振周波数  $f_3$  における挿入損失  $IL_3$  および電力半値幅  $\Delta f_3$  を求める。そして、ネットワークアナライザ 16 は、 $TE_{011}$  モードでの共振周波数  $f_3$ 、共振周波数  $f_3$  における挿入損失  $IL_3$  および電力半値幅  $\Delta f_3$  のデータを演算処理装置 18 に出力する。

#### 【0046】

演算処理装置 18 は、ネットワークアナライザ 16 から入力された共振周波数  $f_1$ 、挿入損失  $IL_1$ 、電力半値幅  $\Delta f_1$  および共振周波数  $f_2$  を基に、以下の式 (1) ~ 式 (3) を用いて、空洞共振器 14 の内壁の実効導電率  $\sigma$ 、粉体状の誘電体 110 が空洞共振器 14 の閉空間内に封入されていない状態における空洞共振器 14 の無負荷 Q 値である  $Q_1$  および空洞共振器 14 の閉空間の見かけの直径  $D$  を求める。

#### 【0047】

##### 【数 1】

$$\left. \begin{aligned} D &= \frac{c}{\pi} \sqrt{\frac{j_{n_2 m_2}^2 \cdot l_1^2 - j_{n_1 m_1}^2 \cdot l_2^2}{f_2^2 \cdot l_1^2 - f_1^2 \cdot l_2^2}} \\ H &= \frac{c}{2} \sqrt{\frac{j_{n_2 m_2}^2 \cdot l_1^2 - j_{n_1 m_1}^2 \cdot l_2^2}{f_1^2 \cdot j_{n_2 m_2}^2 - f_2^2 \cdot j_{n_1 m_1}^2}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

H：閉空間の見かけの高さ

D：閉空間の見かけの直径

$j'_{n_1 m_1}$ ： $n_1$  次の第一種ベッセル関数の微分を  $j'_{n_1}(x)$  としたときの  $j'_{n_1}(x)=0$  なる第  $m_1$  番目の解

$j'_{n_2 m_2}$ ： $n_2$  次の第一種ベッセル関数の微分を  $j'_{n_2}(x)$  としたときの  $j'_{n_2}(x)=0$  なる第  $m_2$  番目の解

c：真空中の光速度

#### 【0048】

【数 2】

$$Q_1 = \frac{\frac{f_1}{\Delta f_1}}{1 - 10^{-IL_1/20}} \quad (2)$$

f<sub>1</sub>: 共振周波数Δf<sub>1</sub>: 電力半値幅IL<sub>1</sub>: 挿入損失

【0049】

【数 3】

$$\sigma = \frac{4\pi f_1 Q^2 \left\{ J_{n_m}^4 + 2 \left( J_{n_m}^2 l_1 \pi \right)^2 \left( \frac{D}{2H} \right)^3 + \left( 1 - \frac{D}{H} \right) \left( \frac{n_1 l_1 \pi D}{2H} \right)^2 \right\}^2}{\mu_0 c^2 \left( J_{n_m}^2 - n_1^2 \right)^2 \left\{ J_{n_m}^2 + \left( \frac{l_1 \pi D}{2H} \right)^2 \right\}^3} \quad (3)$$

σ: 空洞共振器の内壁の実効導電率

μ<sub>0</sub>: 真空中の透磁率

π: 円周率

【0050】

次いで、演算処理装置 18 は、ネットワークアナライザ 16 から入力された共振周波数 f<sub>3</sub>、電力半値幅 Δf<sub>3</sub>、挿入損失 IL<sub>3</sub> および既に求められた空洞共振器 14 の閉空間の見かけの直径 D ならびに閉空間内に封入された気体の層 112 の厚さ L<sub>1</sub> および粉体状の誘電体 110 と気体とが混合した混合体の層 118 の厚さ L<sub>2</sub> を、式 (4) および (5) に代入して、粉体状の誘電体 110 が空洞共振器 14 に封入された状態における空洞共振器 14 の無負荷 Q 値である Q<sub>3</sub> および粉体状の誘電体 110 と気体とが混合した混合体の層 118 の複素誘電率のうち比誘電率 ε<sub>r2</sub> を算出する。

【0051】

ここに、気体の層 112 の厚さ L<sub>1</sub> および粉体状の誘電体 110 と気体とが混合した混合体の層 118 の厚さ L<sub>2</sub> は、予め設定された値であって、測定者によって設定されたあと、演算処理装置 18 に入力される。

【0052】

【数 4】

$$Q_3 = \frac{f_3 / \Delta f_3}{1 - 10^{-IL_3/20}} \quad (4)$$

 $f_3$ : 共振周波数 $\Delta f_3$ : 電力半値幅 $IL_3$ : 挿入損失

【0053】

【数 5】

$$\left. \begin{aligned} L_1 \frac{\tan X_1}{X_1} + L_2 \frac{\tan X_2}{X_2} &= 0 \\ X_1 &= \beta_1 L_1 \\ X_2 &= \beta_2 L_2 \\ \beta_1 &= \sqrt{\varepsilon_{r1} k_0^2 - k_r^2} \\ \beta_2 &= \sqrt{\varepsilon_{r2} k_0^2 - k_r^2} \\ k_r &= \frac{2j'_{nm}}{D} \\ k_0 &= \frac{2\pi f_3}{c} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

 $L_1$ : 気体の層 112 の厚さ $L_2$ : 粉体状の誘電体 110 と気体とが混合した混合体の層 118 の厚さ $D$ : 閉空間の見かけの直径 $\varepsilon_{r1}$ : 気体の比誘電率 $\varepsilon_{r2}$ : 粉体状の誘電体 110 と気体とが混合した混合体の層 118 の比誘電率 $j'_{nm}$ :  $n$  次の第一種ベッセル関数の微分を  $j'_n(x)$  としたときの  $j'_n(x)=0$  なる第  $m$  番目の解

【0054】

次いで、演算処理装置 18 は、既に算出した実効導電率  $\sigma$ 、粉体状の誘電体 110 が空洞共振器 14 に封入された状態における空洞共振器 14 の無負荷  $Q$  値である  $Q_3$ 、閉空間の見かけの直径  $D$ 、閉空間内に封入された気体の層 112 の厚さ  $L_1$  および粉体状の誘電体 110 と気体とが混合した混合体の層 118 の厚さ  $L_2$  を、式 (6) に代入して、粉体状の誘電体 110 と気体とが混合した混合体の層 118 の複素誘電率のうち誘電正接を算出する。

【0055】



【数 6】

$$\begin{aligned}
\tan \delta &= \frac{A}{Q_3} - R_s B \\
A &= 1 + \frac{W_{e1}}{W_{e2}} \\
B &= \frac{P_{cy1} + P_{cy2} + P_{end1} + P_{end2}}{2\omega W_{e2} R_s} \\
W_{e1} &= \frac{1}{8} \varepsilon_{r1} \varepsilon_0 \omega^2 \mu_0^2 j_{01}'^2 J_0^2(j_{01}') \pi L_1 \left( 1 - \frac{\sin 2X_1}{2X_1} \right) \\
W_{e2} &= \frac{1}{8} \varepsilon_{r2} \varepsilon_0 \omega^2 \mu_0^2 j_{01}'^2 J_0^2(j_{01}') \pi L_2 \left( 1 - \frac{\sin 2X_2}{2X_2} \right) \frac{\sin^2 X_1}{\sin^2 X_2} \\
P_{cy1} &= \frac{1}{4} R_s k_r^4 J_0^2(j_{01}') D \pi L_1 \left( 1 - \frac{\sin 2X_1}{2X_1} \right) \\
P_{cy2} &= \frac{1}{4} R_s k_r^4 J_0^2(j_{01}') D \pi L_2 \left( 1 - \frac{\sin 2X_2}{2X_2} \right) \frac{\sin^2 X_1}{\sin^2 X_2} \\
P_{end1} &= \frac{1}{2} R_s \left( \frac{X_1}{L_1} \right)^2 j_{01}'^2 \pi J_0^2(j_{01}') \\
P_{end2} &= \frac{1}{2} R_s \left( \frac{X_2}{L_2} \right)^2 j_{01}'^2 \pi J_0^2(j_{01}') \frac{\sin^2 X_1}{\sin^2 X_2} \\
R_s &= \sqrt{\frac{\pi f_3 \mu_0}{\sigma}} \\
\omega &= 2\pi f_3
\end{aligned} \tag{6}$$

Q<sub>3</sub>: 粉体状の誘電体 110 が空洞共振器 14 に封入された状態における空洞共振器 14 の無負荷 Q 値

W<sub>e1</sub>: 気体の層 112 の電界の蓄積エネルギー

W<sub>e2</sub>: 粉体状の誘電体 110 と気体とが混合した混合体の層 118 の電界の蓄積エネルギー

P<sub>cy1</sub>: シリンダ 114 の気体の層 112 と接する部分における導体損

P<sub>cy2</sub>: シリンダ 114 の粉体状の誘電体 110 と気体とが混合した混合体の層 118 と接する部分における導体損

P<sub>end1</sub>: 第一のピストン 120 の気体の層 112 と接する部分における導体損

P<sub>end2</sub>: 第二のピストン 140 の粉体状の誘電体 110 と気体とが混合した混合体の層 1

18と接する部分における導体損

$\omega$ : 角周波数

$R_s$ : 空洞共振器の内壁の表面抵抗

$j'_{01}$ : 0次の第一種ベッセル関数の微分を $j'_0(x)$ としたときの $j'_0(x)=0$ なる第一番目の解

【0056】

以上により、粉体状の誘電体110と気体とが混合した混合体の層118の複素誘電率として比誘電率 $\epsilon_{r2}$ および誘電正接が算出される。

【0057】

さらに、演算処理装置18は、こうして算出した粉体状の誘電体110と気体とが混合した混合体の層118の比誘電率 $\epsilon_{r2}$ を対数混合則、リヒトネッカロータの式またはウィナーの式等の、粉体と気体とが混合した混合体の層118の比誘電率 $\epsilon_{r2}$ から粉体状の比誘電率 $\epsilon_r$ を算出する式に適用して、粉体状の誘電体110の比誘電率 $\epsilon_r$ を算出する。

【0058】

周知のように、対数混合則は、次式によって表される。

$$\log \epsilon_r = v_1 \log \epsilon_{r1} + v_2 \log \epsilon_{r2}$$

【0059】

また、リヒトネッカロータの式は、次式によって表される。

$$\epsilon_r^k = v_1 \epsilon_{r1}^k + v_2 \epsilon_{r2}^k$$

【0060】

一方、ウィナーの式は、次式によって表される。

$$1/(\epsilon_r + u) = v_1/(\epsilon_{r1} + u) + v_2/(\epsilon_{r2} + u)$$

$\epsilon_r$ : 粉体状の誘電体の比誘電率

$\epsilon_{r1}$ : 気体の比誘電率

$\epsilon_{r2}$ : 粉体状の誘電体110と気体とが混合した混合体の層118の比誘電率

$v_1$ : 気体の体積比率

$v_2$ : 粉体状の誘電体の体積比率

$k$ : フィッティングパラメータ ( $-1 \leq k \leq 1$ )

$u$ : フィッティングパラメータ ( $0 \leq u$ )

【0061】

これらの式によって、粉体状の誘電体の比誘電率 $\epsilon_r$ が算出される。

【0062】

たとえば、気体として空気を用い、粉体状の誘電体110と空気とが混合した混合体の層118の比誘電率 $\epsilon_{r2}$ から、粉体状の誘電体110の比誘電率 $\epsilon_r$ を算出する場合には、空気の比誘電率 $\epsilon_{r1}$ は1.0である。また、空気の体積比率 $v_1$ および粉体状の誘電体の体積比率 $v_2$ は、混合体の層118に封入される気体の体積および粉体状の誘電体110の体積により決定されるから、粉体状の誘電体110と空気とが混合した混合体の層118の比誘電率 $\epsilon_{r2}$ が求められれば、粉体状の誘電体110の比誘電率 $\epsilon_r$ を算出することができる。

【0063】

さらに、演算処理装置18は、こうして算出した粉体状の誘電体110と気体とが混合した混合体の層118の誘電正接を、粉体状の誘電体110と気体とが混合した混合体の層118の誘電正接を粉体と気体とが混合した混合体の層118の誘電正接から、粉体状の誘電正接を算出する式である混合則の式に適用して、粉体状の誘電体110の誘電正接を算出する。

【0064】

誘電正接を算出のための混合則は、次式によって表される。

$$\tan \delta = v_1 \tan \delta_1 + v_2 \tan \delta_2$$

$\tan \delta$  : 粉体状の誘電体の誘電正接

$\tan \delta_1$  : 気体の誘電正接

$\tan \delta_2$  : 粉体状の誘電体 110 と気体とが混合した混合体の層 118 の誘電正接

$v_1$  : 気体の体積比率

$v_2$  : 粉体状の誘電体の体積比率

【0065】

これらの式によって、粉体状の誘電体の誘電正接が算出される。

【0066】

たとえば、気体として空気を用い、粉体状の誘電体 110 と空気とが混合した混合体の層 118 の誘電正接から、粉体状の誘電体 110 の誘電正接を算出する場合には、空気の誘電正接  $\tan \delta_1$  は 0 と見なすことができ、また、粉体状の誘電体の体積比率  $v_2$  は、混合体の層 118 に封入される気体の体積および粉体状の誘電体 110 の体積により決定されるから、粉体状の誘電体 110 と空気とが混合した混合体の層 118 の誘電正接  $\tan \delta_2$  が求められれば、粉体状の誘電体 110 の誘電正接を算出することができる。

【0067】

以上のようにして、粉体状の誘電体 110 の比誘電率  $\epsilon_r$  および誘電正接が求められ、結果として粉体状の誘電体 110 の複素誘電率が求められる。

【0068】

本実施形態においては、数 GHz 以上の高周波帯域での誘電体の複素誘電率のうち比誘電率を測定する場合に、空洞共振器 14 内に、粉体状の誘電体および気体を封入し、ネットワークアナライザ 16 から空洞共振器 14 内に電磁波を入力し、電磁波が入力された空洞共振器 14 からネットワークアナライザ 16 に入力された電磁波の TE モードにおける共振周波数  $f_3$ 、電力半値幅  $\Delta f_3$  および挿入損失  $IL_3$  を測定して、粉体状の誘電体 110 と気体とが混合した混合体の層 118 の比誘電率  $\epsilon_{r2}$  を算出し、さらに、算出した粉体状の誘電体 110 と気体とが混合した混合体の層 118 の比誘電率  $\epsilon_{r2}$  を、対数混合則、リヒトネッカロータの式またはウイナーの式などの、粉体状の誘電体 110 と気体とが混合した混合体の層 118 の比誘電率  $\epsilon_{r2}$  から粉体状の比誘電率  $\epsilon_r$  を算出する式に適用して、粉体状の誘電体 110 の比誘電率  $\epsilon_r$  を算出するように構成されている。

【0069】

したがって、上記構成によれば、数 GHz 以上の高周波帯域においても、粉体状の誘電体 110 の複素誘電率のうち比誘電率を、高い精度で、測定することが可能となる。

【0070】

また、上記構成においては、数 GHz 以上の高周波帯域での誘電体の複素誘電率のうち誘電正接を測定する場合に、空洞共振器 14 内に、粉体状の誘電体および気体を封入し、ネットワークアナライザ 16 から空洞共振器 14 内に電磁波を入力し、電磁波が入力された空洞共振器 14 からネットワークアナライザ 16 に入力された電磁波の TE モードにおける共振周波数  $f_3$ 、電力半値幅  $\Delta f_3$  および挿入損失  $IL_3$  を測定して、粉体状の誘電体 110 と気体とが混合した混合体の層 118 の誘電正接を算出し、さらに、粉体状の誘電体 110 と気体とが混合した混合体の層 118 の誘電正接から粉体状の誘電正接を算出する混合則の式に適用して、粉体状の誘電体 110 の誘電正接を算出するように構成されている。

【0071】

したがって、本実施形態によれば、数 GHz 以上の高周波帯域においても、粉体状の誘電体 110 の複素誘電率のうち誘電正接を、高い精度で、測定することが可能となる。

【0072】

(誘電体の成形物の複素誘電率測定)

次に、主として図 5 を参照しながら、誘電体の成形物の複素誘電率の測定について説明する。ここでは、円柱状に誘電体を成形して、複素誘電率測定を行う場合について説明する。以下の説明では、粉体状の誘電体の複素誘電率測定と同様の箇所については、簡易な説明を用いて省略するとともに、粉体状の誘電体の場合と類似した微妙に定義が異なる文

字については、再定義して同一の文字を使うものとする。

【0073】

誘電体の成形物の複素誘電率を測定するにあたっては、粉体状の誘電体を測定する場合と同様に、まず、空気やアルゴンガスや窒素ガスなどの気体が、空洞共振器 14 内に形成された閉空間 109 内に封入され、この状態でネットワークアナライザ 16 から閉空間 109 内に電磁波を入力し、閉空間 109 内に入力された電磁波の出力を解析して、TE<sub>011</sub>モードでの共振周波数  $f_1$ 、共振周波数  $f_1$  における挿入損失  $IL_1$  および電力半値幅  $\Delta f_1$ 、ならびに TE<sub>012</sub>モードでの共振周波数  $f_2$  を測定する。

【0074】

そして、複素誘電率を測定すべき円柱状の誘電体の成形物 110A が空洞共振器 14 の閉空間 109 内に封入される。ここで、円柱状の誘電体の成形物 110A の断面の径は、貫通孔 116 の内径と等しくなるように成形されている。

【0075】

その結果、図 5 に示されるように、空洞共振器 14 の閉空間内に、空気やアルゴンガスや窒素ガスなどの気体の層 112 が形成される。

【0076】

次いで、複素誘電率を測定すべき円柱状の誘電体の成形物 110A が封入された空洞共振器 14 内に、粉体状の成形物 110 の場合と同様に、電磁波がネットワークアナライザ 16 から、同軸ケーブル 122 およびループアンテナ 124 を介して閉空間 109 内に出力され、閉空間 109 からループアンテナ 124 を介して電磁波を受信して、ネットワークアナライザ 16 に出力される。

【0077】

そして、ネットワークアナライザ 16 は、閉空間 109 から出力された電磁波から TE<sub>011</sub>モードでの共振周波数  $f_3$ 、共振周波数  $f_3$  における挿入損失  $IL_3$  および電力半値幅  $\Delta f_3$  を算出する。

【0078】

そして、演算処理装置 18 は、ネットワークアナライザ 16 から入力された共振周波数  $f_1$ 、挿入損失  $IL_1$ 、電力半値幅  $\Delta f_1$  および共振周波数  $f_2$  が、先述の式 (1) ~ 式 (3) に代入され、空洞共振器 14 の内壁の実効導電率  $\sigma$ 、円柱状の誘電体の成形物 110A が空洞共振器 14 の閉空間内に封入されていない状態における空洞共振器 14 の無負荷 Q 値である  $Q_1$  および空洞共振器 14 の閉空間の見かけの直径  $D$  が求められる。

【0079】

次いで、演算処理装置 18 は、ネットワークアナライザ 16 から入力された共振周波数  $f_3$ 、電力半値幅  $\Delta f_3$ 、挿入損失  $IL_3$  および既に求められた空洞共振器 14 の閉空間の見かけの直径  $D$  ならびに閉空間内に封入された気体の層 112 の厚さ  $L_1$  および円柱状の誘電体の成形物 110A の厚さ  $L_2$  を、式 (4) および (5) に代入して、円柱状の誘電体の成形物 110A が空洞共振器 14 に封入された状態における空洞共振器 14 の無負荷 Q 値である  $Q_3$  および円柱状の誘電体の成形物 110A の複素誘電率のうち比誘電率  $\epsilon_{r2}$  を算出する。

【0080】

ここに、気体の層 112 の厚さ  $L_1$  および円柱状の誘電体の成形物 110A の厚さ  $L_2$  は、予め設定された値であって、測定者によって設定されたあと、演算処理装置 18 に入力される。

【0081】

次いで、演算処理装置 18 は、既に算出した実効導電率  $\sigma$ 、円柱状の誘電体の成形物 110A が空洞共振器 14 に封入された状態における空洞共振器 14 の無負荷 Q 値である  $Q_3$ 、閉空間の見かけの直径  $D$ 、閉空間内に封入された気体の層 112 の厚さ  $L_1$  および円柱状の誘電体の成形物 110A の厚さ  $L_2$  を、式 (6) に代入して、円柱状の誘電体の成形物 110A の複素誘電率のうち誘電正接を算出する。

【0082】

以上のようにして、円柱状の誘電体の成形物 110A の比誘電率  $\epsilon_{r2}$  および誘電正接が求められ、結果として円柱状の誘電体の成形物 110A の複素誘電率が求められる。粉体状の誘電体 110 と異なり、誘電体が成形物である場合には、式 (1) ~ (6) を用いることにより、直接誘電体の複素誘電率を求めることが可能である。

#### 【0083】

以上説明したように、本実施形態においては、空洞共振器 14 内に、円柱状の誘電体の成形物 110A および気体を封入し、ネットワークアナライザ 16 から空洞共振器 14 内に電磁波を入力し、電磁波が入力された空洞共振器 14 からネットワークアナライザ 16 に入力された電磁波の TE モードにおける共振周波数  $f_3$ 、電力半値幅  $\Delta f_3$  および挿入損失  $IL_3$  を測定して、円柱状の誘電体の成形物 110A の複素誘電率を算出するように構成されている。

#### 【0084】

したがって、本実施形態によれば、円柱状の誘電体の成形物 110A の複素誘電率を、高い精度で、測定することが可能となる。

#### 【0085】

なお、図 2 ~ 図 5 に示す構成に対しては、以下のような変形例が考えられる。

#### 【0086】

図 6 は、空洞共振器 14 の閉空間 109 を真空にするための真空装置を含む粉体状の誘電体 110 または誘電体の成形物 110A の複素誘電率の測定装置 12A を表す図である。

#### 【0087】

本変形例では、空洞共振器 14 が真空装置 146 によって覆われている。この真空装置 146 は、真空槽 148 と真空ポンプ 150 を備えている。真空槽 148 は、真空槽 148 に接続されている真空ポンプ 150 を用いることによって、真空の状態となる。真空槽 148 の内部に、空洞共振器 14 が設けられおり、真空槽 148 の内部を真空状態にすることによって、結果として空洞共振器 14 の閉空間も真空の状態となる。

#### 【0088】

本変形例では、空洞共振器 114 内に粉体状の誘電体 110 または誘電体の成形物 110A を封入してから、真空装置 146 を用いて空洞共振器 14 の内部を真空状態にすることにより、粉体状の誘電体 110 または誘電体の成形物 110A に含まれる水分を除去することが可能となる。粉体状の誘電体 110 または誘電体の成形物 110A に含まれる水分を除去した状態で、空洞共振器 14 に封入した粉体状の誘電体 110 または誘電体の成形物 110A の複素誘電率を測定することにより、粉体状の誘電体 110 または誘電体の成形物 110A の複素誘電率の測定の精度を高めることができる。

#### 【0089】

(第 2 実施形態)

以下、本発明に係る誘電体の複素誘電率の測定装置及び測定方法の第 2 実施形態について、詳細に説明する。本実施形態は、図 1 に示すモード発生器として導波管を用いた例である。

#### 【0090】

図 7 は、本実施形態における測定装置の構成を示すブロック図であり、図 8 ~ 図 10 は、それぞれ導波管を示す図である。

#### 【0091】

図 7 に示すように、誘電特性測定装置 200 は、導波装置 201 と、測定器 202 とを備えている。

#### 【0092】

導波装置 201 は、図 1 に示すモード発生器として適用されるものであり、図 8 ~ 図 10 に示すようないわゆる電磁波を伝搬する導波管 210, 220, 230 によって構成されている。

図 8 に示す導波管 210 は、いわゆる同軸型の導波管であり、内部が空洞となっている

円筒型の外部導体 211 と、その外部導体 211 の内部に同軸配置されている円柱状の中心導体 212 とから構成されている。本実施形態では、この、測定対象となる粉体と気体または液体との混合体 213 が、外部導体 211 と中心導体 212 との間の空隙 214 に充填される。

【0093】

また、図 9 に示す導波管 220 は、いわゆる方形型の導波管であり、内部に断面視矩形状の空隙 222 が形成された導体 221 によって構成されている。そして、測定対象となる粉体と、気体または液体との混合体 223 はその空隙 222 に入れられることにより、導波管 220 の内部に充填される。

【0094】

また、図 10 に示す導波管 230 は、いわゆる円形型の導波管であり、内部に断面視円形の空隙 232 が形成された円筒型の外部導体 231 によって構成されている。そして、測定対象となる粉体と、液体または気体とからなる混合体 233 は空隙 232 に入れられることにより、円形導波管型導波路 230 の内部に充填される。

【0095】

なお、導波管 210, 220, 230 は、空気以外の気体または液体を使用して、その気体または液体と、粉体とからなる混合体 213 の比誘電率を測定する場合は、その気体または液体がそれぞれ空隙 214, 222, 232 から流れ出さないように、導波管 210, 220, 230 にその気体または液体を保持するためのシール部（不図示）が設けられる。

【0096】

再度、図 7 に戻って、説明を行う。

測定器 202 は、ネットワークアナライザ 203 と、演算処理装置 204 とを含んでいる。この測定器 202 は、導波装置 201 を励振させると共に、導波装置 201 の出力信号を解析する。

【0097】

ネットワークアナライザ 203 は、導波路で構成されている導波装置 201 に入力する電磁波を発生させ、導波装置 201 から供給されたアナログデータをデジタル処理する。

また、演算処理装置 204 は、ネットワークアナライザ 203 から供給されるデジタルデータを取り込み、誘電特性測定および出力のための処理を行う。

【0098】

次に、誘電特性測定装置 200 を用いた誘電特性測定方法を説明する。ネットワークアナライザ 203 から導波装置 201 に高周波電磁波を入射して、導波装置 201 を励振させる。そして、導波装置 201 の透過波および反射波をネットワークアナライザ 203 に供給する。ネットワークアナライザ 203 からの出力データを演算処理装置 204 に取り込み、導波装置 201 内に充填された混合体の比誘電率を計算する。

【0099】

そして、演算処理装置 204 は、このようにして得られた粉体と気体または液体との複合体の比誘電率  $\epsilon$  を、対数混合則、リヒトネッカロータの式またはウイナーの式のような混合材料の比誘電率を算出する式に適用して、粉体の比誘電率を算出する。ここで、これらの式について説明する。

【0100】

対数混合則は次に示す式によって表される。

$$\log \epsilon = v_1 \log \epsilon_1 + v_2 \log \epsilon_2$$

【0101】

また、リヒトネッカロータの式は次のように表される。

$$\epsilon^k = v_1 \epsilon_1^k + v_2 \epsilon_2^k$$

【0102】

また、ウイナーの式は次のように表される。

$$1 / (\epsilon + u) = v_1 / (\epsilon_1 + u) + v_2 / (\epsilon_2 + u)$$

$\epsilon$  : 混合体の比誘電率

$\epsilon_1$  : 気体または液体の比誘電率

$\epsilon_2$  : 粉体の比誘電率

$v_1$  : 気体または液体の体積比率

$v_2$  : 粉体の体積比率

$k$  : フィッティングパラメータ ( $-1 \leq k \leq 1$ )

$u$  : フィッティングパラメータ ( $0 \leq u$ )

#### 【0103】

これらの式が用いられることにより、粉体の比誘電率  $\epsilon_2$  が計算される。例えば気体として空気を使用して、粉体と空気との混合体の比誘電率  $\epsilon$  から粉体の比誘電率  $\epsilon_2$  を求める場合、これらの式において空気の比誘電率  $\epsilon_1$  は「1.0」と既知であり、また、空気の体積比率  $v_1$  および粉体の体積比率  $v_2$  は、それぞれ導波路の空間に入れる粉体の量により決まる。従って、粉体と空気の混合体の比誘電率  $\epsilon$  がわかれば、粉体の比誘電率  $\epsilon_2$  を求めることができる。

#### 【実施例】

##### 【0104】

以下、本発明の効果をより明瞭なものとするため、実施例を掲げる。

##### (実施例1)

##### 【0105】

密度が  $3.99 \text{ g/cm}^3$  で、平均粒径が  $9.8 \mu\text{m}$  の粉体状の  $\text{Al}_2\text{O}_3$  の試料A、密度が  $3.99 \text{ g/cm}^3$  で、平均粒径が  $17.8 \mu\text{m}$  の粉体状の  $\text{Al}_2\text{O}_3$  の試料Bおよび密度が  $3.99 \text{ g/cm}^3$  で、平均粒径が  $134.7 \mu\text{m}$  の粉体状の  $\text{Al}_2\text{O}_3$  の試料Cを用意した。

##### 【0106】

測定装置として、図2に示された測定装置12を用いて、空洞共振器14に形成された閉空間内に、体積比率が0.39となるように、試料Aを封入し、真空中で試料Aと空気とが混合した混合体の層18の比誘電率および誘電正接を測定した。

##### 【0107】

まず、空洞共振器14に形成された直径16mmの貫通孔116の下方から、第二のピストン40を挿入し、位置決めして、ねじ134bにより固定する。さらに、貫通孔116の上方から、第一のピストン120を挿入し、空気の層12の厚さ  $L_1$  が12mmとなるように、第一のピストン120を位置決めして、第一のピストン120を、ねじ134aにより固定し、空洞共振器14内に、空気を封入した。

##### 【0108】

次いで、ネットワークアナライザ16から、周波数がGHz以上の電磁波を、同軸ケーブル122およびループアンテナ124を介して、空洞共振器14内に出力した。

##### 【0109】

さらに、電磁波の入力に応答して、空洞共振器14から出力された電磁波を、ループアンテナ124によって受信し、同軸ケーブル122を介して、ネットワークアナライザ16に入力した。

##### 【0110】

次いで、同軸ケーブル122を介して、入力された電磁波から、ネットワークアナライザ16によって、共振モードのうち、TE<sub>011</sub>モードでの共振周波数  $f_1$ 、共振周波数  $f_1$  における挿入損失  $IL_1$  および電力半値幅  $\Delta f_1$  ならびにTE<sub>012</sub>モードでの共振周波数  $f_2$  を測定した。

##### 【0111】

こうして、ネットワークアナライザ16によって測定されたTE<sub>011</sub>モードでの共振周波数  $f_1$ 、共振周波数  $f_1$  における挿入損失  $IL_1$  および電力半値幅  $\Delta f_1$  ならびにTE<sub>012</sub>

モードでの共振周波数  $f_2$  を、ネットワークアナライザ 16 から演算処理装置 18 に出力した。

【0112】

TE<sub>011</sub>モードでの共振周波数  $f_1$ 、共振周波数  $f_1$  における挿入損失  $IL_1$  および電力半値幅  $\Delta f_1$  ならびに TE<sub>012</sub>モードでの共振周波数  $f_2$  を、ネットワークアナライザ 16 から、演算処理装置 18 に出力したのち、貫通孔 116 から、一旦、第一のピストン 120 を外して、貫通孔 116 内に、3.13 g の試料 A を投入した。次いで、第一のピストン 120 とは異なり、ピストンを構成する円柱体の先端部が平坦であるピストンを用いて、試料 A と気体とが混合した混合体の層 18 の厚さ  $L_2$  が 10 mm になるように加圧し、試料 A の表面をならしてから、再度、第一のピストン 120 を貫通孔 116 の上方から挿入し、空気の層 12 の厚さ  $L_1$  が 2 mm となるように、第一のピストン 120 の位置を調整し、第一のピストン 120 を、ねじ 134 a によって固定した。

【0113】

さらに、試料 A が封入された空洞共振器 14 に、ネットワークアナライザ 16 から、電磁波を、同軸ケーブル 122 およびループアンテナ 124 を介して、出力し、電磁波の入力に応答して、空洞共振器 14 から出力された電磁波を、ループアンテナ 124 によって受信し、同軸ケーブル 122 を介して、ネットワークアナライザ 16 に入力した。

【0114】

同軸ケーブル 122 を介して、入力された電磁波から、ネットワークアナライザ 16 によって、共振モードのうち、TE<sub>011</sub>モードでの共振周波数  $f_3$ 、共振周波数  $f_3$  における挿入損失  $IL_3$  および電力半値幅  $\Delta f_3$  を測定した。

【0115】

こうして、ネットワークアナライザ 16 によって測定された TE<sub>011</sub>モードでの共振周波数  $f_3$ 、共振周波数  $f_3$  における挿入損失  $IL_3$  および電力半値幅  $\Delta f_3$  を、ネットワークアナライザ 16 から演算処理装置 18 に出力した。

【0116】

次いで、演算処理装置 18 により、ネットワークアナライザ 16 から入力された共振周波数  $f_1$ 、挿入損失  $IL_1$ 、電力半値幅  $\Delta f_1$  および共振周波数  $f_2$  を、式 (1) ~ 式 (3) に代入し、空洞共振器 14 の内壁の実効導電率  $\sigma$ 、試料 A が空洞共振器 14 の閉空間内に封入されていない状態における空洞共振器 14 の無負荷 Q 値である  $Q_1$  および空洞共振器 14 の閉空間の見かけの直径  $D$  を求めた。

【0117】

さらに、演算処理装置 18 により、ネットワークアナライザ 16 から入力された共振周波数  $f_3$ 、電力半値幅  $\Delta f_3$ 、挿入損失  $IL_3$  および既に求めた空洞共振器 14 の閉空間の見かけの直径  $D$  ならびに閉空間内に封入された空気の層 12 の厚さ  $L_1$  および試料 A と空気とが混合した混合体の層 18 の厚さ  $L_2$  を、式 (4) および (5) に代入して、試料 A が空洞共振器 14 に封入された状態における空洞共振器 14 の無負荷 Q 値である  $Q_3$  および試料 A と空気とが混合した混合体の層 18 の比誘電率  $\epsilon_{r2}$  を求めた。

【0118】

次いで、演算処理装置 18 により、既に算出した実効導電率  $\sigma$ 、試料 A が空洞共振器 14 に封入された状態における空洞共振器 14 の無負荷 Q 値である  $Q_3$ 、閉空間のみかけの直径  $D$ 、閉空間内に封入された気体の層 12 の厚さ  $L_1$  および試料 A と気体とが混合した混合体の層 18 の厚さ  $L_2$  を、式 (6) に代入して、試料 A と気体とが混合した混合体の層 18 の誘電正接を求めた。

【0119】

こうして、体積比率が 0.39 である試料 A と空気とが混合した混合体の層 18 の比誘電率  $\epsilon_{r2}$  および誘電正接が得られた。

【0120】

次いで、空洞共振器 14 に形成された閉空間内に封入する試料 A の質量を変化させて、試料 A の体積比率を、0.54 まで、徐々に変化させて、試料 A の体積比率が 0.39 の



ときと同様に、試料Aと空気とが混合した混合体の層18の比誘電率 $\epsilon_{r2}$ および誘電正接を求めた。

【0121】

さらに、演算処理装置18により、異なる体積比率で、試料Aと空気とが混合した混合体の層18の比誘電率 $\epsilon_{r2}$ から、試料Aの比誘電率 $\epsilon_r$ を、以下のようにして、求めた。

【0122】

まず、試料Aの比誘電率 $\epsilon_r$ の測定精度を向上させるために、試料Aと空気とが混合した体積比率が異なる混合体の層18の比誘電率 $\epsilon_{r2}$ の測定誤差を考慮して、試料Aと空気とが混合した体積比率が異なる混合体の層18の比誘電率 $\epsilon_{r2}$ を、最小二乗法により、対数混合則、リヒトネッカーロータの式およびウイナーの式にフィッティングし、横軸を、試料Aの体積比率、縦軸を、試料Aと空気とが混合した混合体の層18の比誘電率 $\epsilon_{r2}$ として、グラフを作成した。

【0123】

図11および図12は、試料Aと空気とが混合した体積比率が異なる混合体の層18の比誘電率 $\epsilon_{r2}$ を、最小二乗法により、対数混合則にフィッティングして、得られたグラフであり、図12は、図11に示されたグラフを拡大したもので、試料Aの体積比率が0.38～0.54の範囲にあるときのグラフを示している。

【0124】

図13および図14は、試料Aと空気とが混合した体積比率が異なる混合体の層18の比誘電率 $\epsilon_{r2}$ を、最小二乗法により、リヒトネッカーロータの式にフィッティングして、得られたグラフであり、図14は、図13に示されたグラフを拡大したもので、試料Aの体積比率が0.38～0.54の範囲にあるときのグラフを示している。

【0125】

図15および図16は、試料Aと空気とが混合した体積比率が異なる混合体の層18の比誘電率 $\epsilon_{r2}$ を、最小二乗法により、ウイナーの式にフィッティングして、得られたグラフであり、図16は、図15に示されたグラフを拡大したもので、試料Aの体積比率が0.38～0.54の範囲にあるときのグラフを示している。

【0126】

図11、図13および図15において、試料Aの体積比率が1.0であるということは、試料Aと空気とが混合した混合体の層18中に、空気が存在せず、試料Aと空気とが混合した混合体の層18中に、試料Aのみが存在していることを意味しているから、試料Aの体積比率が1.0のときの比誘電率の値が、試料Aの比誘電率 $\epsilon_r$ に対応し、したがって、図11、図13および図15に示された曲線から、試料Aの体積比率が1.0のときの比誘電率の値を読み取って、試料Aの比誘電率 $\epsilon_r$ を求めた。

【0127】

こうして、試料Aの比誘電率 $\epsilon_r$ が得られた。

【0128】

さらに、演算処理装置18により、異なる体積比率で、試料Aと空気とが混合した混合体の層18の誘電正接から、試料Aの誘電正接を、以下のようにして、求めた。

【0129】

試料Aの誘電正接の測定精度を向上させるために、試料Aと空気とが混合した体積比率が異なる混合体の層18の誘電正接の測定誤差を考慮して、試料Aと空気とが混合した体積比率が異なる混合体の層18の誘電正接を、混合則の式に代入し、試料Aの体積比率と、試料Aと空気とが混合した混合体の層18の誘電正接との関係を、原点を通る直線によって近似し、図17に示されるグラフを作成した。

【0130】

図17において、試料Aの体積比率が1.0であるということは、試料Aと空気とが混合した混合体の層18中に、空気が存在せず、試料Aと空気とが混合した混合体の層18中に、試料Aのみが存在していることを意味しているから、試料Aの体積比率が1.0のときの誘電正接の値が、試料Aの誘電正接に対応し、したがって、図17に示された曲線

から、試料Aの体積比率が1.0のときの誘電正接の値を読み取って、試料Aの誘電正接を求めた。

【0131】

次いで、試料Aの比誘電率 $\epsilon_r$ および誘電正接を測定した場合と同様にして、試料Bの比誘電率 $\epsilon_r$ および誘電正接を求めた。

【0132】

すなわち、試料Aの比誘電率 $\epsilon_r$ および誘電正接を測定した場合と同様にして、空洞共振器14に形成された閉空間内に封入する試料Bの質量を変化させることによって、試料Bの体積比率を0.39～0.54の範囲で変化させて、試料Bと空気が混合した混合体の層18の比誘電率 $\epsilon_{r2}$ および誘電正接を求め、試料Bの比誘電率 $\epsilon_r$ および誘電正接を求めた。

【0133】

さらに、試料Aおよび試料Bの比誘電率 $\epsilon_r$ および誘電正接を測定した場合と同様にして、試料Cの比誘電率 $\epsilon_r$ および誘電正接を求めた。

【0134】

試料A、B、Cの比誘電率 $\epsilon_r$ および誘電正接の測定結果は、表1に示されている。

【0135】

【表1】

記号	対数混合則	リヒトネッカーロータの式	ウィーナの式	誘電正接
A	13.11	9.14	12.34	0.0044
B	12.72	9.63	12.77	0.0031
C	12.33	8.27	10.58	0.0017

表1に示されるように、試料A、B、Cの比誘電率として、8.3～13.1の範囲内の値が得られ、本発明によれば、GHzオーダ以上の周波数における粉体状の誘電体の比誘電率が測定可能であることが判明した。

【0136】

また、本発明によれば、GHz以上の周波数における粉体状の誘電正接が測定可能であることも明らかになった。

【0137】

(実施例2)

比誘電率および誘電正接の測定対象として、8.05mmの厚さと16mmの直径を有するテトラフルオロエチレン円柱を用意し、テトラフルオロエチレン円柱を空洞共振器14内に封入する前の空気の層の厚さ $L_1$ を10.05mmとし、実施例1と同様にして、テトラフルオロエチレン円柱の比誘電率および誘電正接を測定した。

【0138】

すなわち、空洞共振器14内に、テトラフルオロエチレン円柱および気体を封入し、ネットワークアナライザ16から空洞共振器14内に電磁波を入力し、電磁波が入力された空洞共振器14からネットワークアナライザ16に入力された電磁波のTEモードにおける共振周波数 $f_3$ 、電力半値幅 $\Delta f_3$ および挿入損失 $IL_3$ を測定することにより、テトラフルオロエチレン円柱の比誘電率 $\epsilon_{r2}$ および誘電正接を求めた。

【0139】

(比較例)

実施例2との比較例として、1.04mmの厚さを有するシート状のテトラフルオロエチレンを用意した。JIS規格で定められている空洞共振器法を用いて、周波数11.4GHzおよび17.9GHzにおけるシート状のテトラフルオロエチレンの比誘電率およ

び誘電正接を求めた。

【0140】

実施例2および比較例において、テトラフルオロエチレン円柱の比誘電率および誘電正接ならびにシート状のテトラフルオロエチレンの比誘電率および誘電正接を測定した結果は、表2に示されている。

【0141】

【表2】

	周波数 [GHz]	比誘電率	誘電正接
実施例1	20.6	2.05	0.00021
比較例	11.4	2.06	0.00021
比較例	18.0	2.06	0.00019

また、実施例2および比較例において、テトラフルオロエチレン円柱の比誘電率およびシート状のテトラフルオロエチレンの比誘電率を測定した結果は、図18に示されている。

【0142】

さらに、実施例2および比較例において、テトラフルオロエチレン円柱の誘電正接およびシート状のテトラフルオロエチレンの誘電正接を測定した結果は、図19に示されている。

【0143】

実施例2のテトラフルオロエチレン円柱の比誘電率と、比較例のシート状のテトラフルオロエチレンの比誘電率は、2.05前後のほぼ等しい値となった。

【0144】

また、実施例2の円柱状のテトラフルオロエチレンの誘電正接と、比較例のシート状のテトラフルオロエチレンの誘電正接は、0.0002前後のほぼ等しい値となった。

【0145】

(実施例3)

実施例3では、図7に示す導波管210を導波装置201として適用した。また、本実施例では、気体として空気を使用した。従って、図7の混合体213は、測定すべき粉体と空気とからなる。また、本実施例においては、導波管210の内部に充填された状態での混合体213の厚さは約20mmであった。

【0146】

以上の導波管210を用いて測定する試料として、本実施形態においては、3種類のセラミックス材料 ( $Al_2O_3$ セラミックス、 $Ba(MgTa)O_3$ セラミックス、 $TiO_2$ セラミックス) の粉体を用意した。そして、各粉体と空気との混合体213を作製し、前述した誘電特性測定装置200を用いて各粉体と空気との混合体213の比誘電率を測定した。また、後述する実施例4の導波管220を用いて混合体の比誘電率を測定した結果と比較するために、 $Ba(Nd, Bi)_2Ti_5O_{14}$ セラミックスについても測定した。この比較した結果については実施例4について説明する際に説明する。この実施例3においては、周波数が5GHzの電磁波を各混合体213に入射させ、その応答により比誘電率を測定した。混合体213における粉体の体積比率を0.32~0.42の間で変化させ、各混合体213の比誘電率を測定した。

【0147】

このようにして得られた粉体と空気との混合体213の比誘電率 $\epsilon$ が、前述した対数混合則、リヒトネッカロータの式またはウイナーの式に適用される。図20~図22に、実施例3の導波管210を用いて測定された各混合体213の比誘電率の実測値と、その実

測値に計算式を適用した結果を示す。これらの図に示されている曲線は、混合体 213 の比誘電率の各実測値を最小二乗法により各式にフィッティングさせて求めたものである。図 20 は、各混合体 213 の比誘電率の実測値と、その実測値に対数混合則を適用した結果を示す図である。図 21 は、各混合体 213 の比誘電率の実測値と、その実測値にリヒトネッカロータの式を適用した結果を示す図である。図 22 は、各混合体 213 の比誘電率の実測値と、その実測値にウイナーの式を適用した結果を示す図である。

#### 【0148】

そして、この測定結果を用いることにより粉体自体の比誘電率を類推することができる。図 23～図 25 に、粉体の比誘電率を類推するためのグラフを示す。この粉体の比誘電率を類推するために、前述した対数混合則などの式を使用し、混合体 13 の比誘電率の各実測値を最小二乗法により各式にフィッティングさせて、粉体の比誘電率を類推するための曲線を算出した。そして、粉体の体積比率が「1.0」のときの空気と粉体との混合体の比誘電率  $\epsilon$  を算出することにより、空気と粉体の混合体における空気の存在を無視して、粉体自体の比誘電率  $\epsilon_2$  を類推することができる。

#### 【0149】

図 23 は、各混合体 213 の比誘電率の実測値を最小二乗法により混合対数則にフィッティングさせた結果を示す図である。図 24 は、各混合体 213 の比誘電率の実測値を最小二乗法によりリヒトネッカロータの式にフィッティングさせた結果を示す図である。図 25 は、各混合体 213 の比誘電率の実測値を最小二乗法によりウイナーの式にフィッティングさせた結果を示す図である。これらの図において、粉体の体積比率が「1.0」の比誘電率の値を読み取ることにより粉体自体の比誘電率を類推することができる。そして、図 23～図 25 から求めた各粉体の比誘電率を図 26～図 28 にまとめて示す。

#### 【0150】

図 26～図 28 は、図 23～図 25 で示されている各式を適用して得られた各粉体の比誘電率と、焼結品の比誘電率とを比較した表である。図 26 は、実測値に対数混合則を適用して得られた各粉体の比誘電率を示す表である。図 27 は、実測値にリヒトネッカロータの式を適用して得られた各粉体の比誘電率を示す表である。図 28 は、実測値にウイナーの式を適用して得られた各粉体の比誘電率を示す表である。

#### 【0151】

図 26 に示すように対数混合則を適用した結果、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ セラミックスの焼結品の比誘電率は「11」であるのに対し、本発明の測定方法によって得られた結果は「14.1」となった。また、 $\text{Ba}(\text{MgTa})\text{O}_3$ セラミックスの焼結品の比誘電率は「24」であるのに対し、本発明の測定方法によって得られた結果は「33.9」となった。また、 $\text{TiO}_2$ セラミックスの焼結品の比誘電率は「104」であるのに対し、本発明の測定方法によって得られた結果は「185.8」となった。

#### 【0152】

また、図 27 に示すようにリヒトネッカロータの式を適用した結果、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ セラミックスの焼結品の比誘電率は「11」であるのに対し、本発明の測定方法によって得られた結果は「15.7」となった。また、 $\text{Ba}(\text{MgTa})\text{O}_3$ セラミックスの焼結品の比誘電率は「24」であるのに対し、本発明の測定方法によって得られた結果は「19.4」となった。また、 $\text{TiO}_2$ セラミックスの焼結品の比誘電率は「104」であるのに対し、本発明の測定方法によって得られた結果は「28.2」となった。

#### 【0153】

また、図 28 に示すようにウイナーの式を適用した結果、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ セラミックスの焼結品の比誘電率は「11」であるのに対し、本発明の測定方法によって得られた結果は「8.75」となった。また、 $\text{Ba}(\text{MgTa})\text{O}_3$ セラミックスの焼結品の比誘電率は「24」であるのに対し、本発明の測定方法によって得られた結果は「42.7」となった。また、 $\text{TiO}_2$ セラミックスの焼結品の比誘電率は「104」であるのに対し、本発明の測定方法によって得られた結果は「152.3」となった。

#### 【0154】

以上の結果より、この実施例 3 においては、導波管 210 を用いることにより、5 GHz の周波数で粉体と空気とからなる混合体の比誘電率を測定することができ、さらに、その結果から粉体自体の比誘電率を推測することができた。

#### 【0155】

次に、図 29 に、混合体 213 の比誘電率の周波数依存性を調べた結果を示す。試料として  $\text{Ba}(\text{Nd}, \text{Bi})_2\text{Ti}_5\text{O}_{14}$  を使用し、粉体と空気とからなる混合体 213 における粉体の密度を変えた場合の個々の密度に対する混合体 213 の比誘電率を測定した。そして、周波数領域を 0.1 ~ 6 GHz まで変化させて混合体 13 の比誘電率  $\epsilon$  を測定した。図 29 に示すように、この 0.1 ~ 6 GHz までの周波数領域においては、混合体 213 の比誘電率は周波数に依存しないことがわかった。従って、実施例 3 における導波管 210 を用いることにより、5 GHz 以外の周波数であっても、0.1 ~ 6 GHz の間においては、5 GHz で測定した場合と同様の結果を得ることができた。

#### 【0156】

次に、図 20 および図 30 を参照しつつ、異なる材料の粉体の比誘電率の大きさを相対比較する。まず、図 20 において混合体 213 における粉体の体積比率が、例えば「0.38」となる点の比誘電率を読み取る。その読み取った値を図 30 に示す。その結果、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  セラミックスの読み取った値は「2.7」となり、 $\text{Ba}(\text{MgTa})\text{O}_3$  セラミックスの読み取った値は「3.8」となり、 $\text{TiO}_2$  セラミックスの読み取った値は「7.3」となった。比誘電率の大小関係は、小さい順に、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  セラミックス、 $\text{Ba}(\text{MgTa})\text{O}_3$  セラミックス、 $\text{TiO}_2$  セラミックスという順になる。それに対して焼結品の比誘電率の大小関係も、小さい順に、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  セラミックス、 $\text{Ba}(\text{MgTa})\text{O}_3$  セラミックス、 $\text{TiO}_2$  セラミックスという順になる。

#### 【0157】

従って、以上の方法によって得られた各粉体の比誘電率の大小関係は、焼結品の比誘電率の大小関係と一致するため、異なる材料の粉体の比誘電率の大小関係の相対比較を上記の方法によって行うことができる。

#### 【0158】

尚、実施例 3 においては、対数混合則を適用して得られた結果を用いて相対比較したが、本発明においてはそれに限られない。リヒトネッカロータの式またはウイナーの式を適用して得られた結果を用いて相対比較しても、同様の結果が得られる。また、粉体の体積比率を「0.38」としたが、この値に限られず他の体積比率を用いて比較しても同様の結果が得られる。

#### 【0159】

(実施例 4)

実施例 4 では、図 8 に示す導波管 220 を導波装置 201 として適用した。尚、実施例 4 においても、気体として空気を使用した。従って、混合体 223 は、測定すべき粉体と空気とからなる。

#### 【0160】

この実施例 4 においても、前述した実施例 3 と同様に、粉体として 3 種類のセラミックス材料 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  セラミックス、 $\text{Ba}(\text{MgTa})\text{O}_3$  セラミックス、 $\text{TiO}_2$  セラミックス) の粉体を用いて、各粉体と空気との混合体 23 を作製した。そして、前述した誘電特性測定装置 200 を用いて各粉体と空気との混合体 223 の比誘電率を測定した。また、前述した実施例 3 の導波管 210 の測定結果と比較するために、 $\text{Ba}(\text{Nd}, \text{Bi})_2\text{Ti}_5\text{O}_{14}$  セラミックスについても測定した。この実施例 4 においては、周波数が 20 GHz の電磁波を各混合体 223 に入射させ、その応答により比誘電率を測定した。そして、実施例 3 と同様に、混合体 223 における粉体の体積比率を変化させ、各混合体 223 の比誘電率を測定した。

#### 【0161】

このようにして得られた粉体と空気との混合体 223 の比誘電率  $\epsilon$  が、前述した対数混合則、リヒトネッカロータの式またはウイナーの式に適用される。そして、この実施例 4

で得られた比誘電率と、実施例 3 で得られた比誘電率とを比較した。その比較した結果を図 3 1 に示す。図 3 1 は、この実施例 4 の導波管 2 2 0 を用いて得られた混合体 2 2 3 の比誘電率と、実施例 3 の導波管 2 1 0 を用いて得られた混合体 2 1 3 の比誘電率とを比較したグラフを表している。

【0162】

図 3 1 において、破線は実施例 4 で使用された導波管 2 2 0 によって測定された混合体 2 2 3 の比誘電率を表している。一方、実線は実施例 3 で使用された導波管 2 1 0 によって測定された混合体 2 1 3 の比誘電率を表している。図 3 1 に示すように、導波管 2 2 0 を用いて測定された各混合体の比誘電率は、導波管 2 1 0 を用いて測定された各混合体の比誘電率にほぼ一致しているのがわかる。従って、この実施例 4 の導波管 2 2 0 を用いることにより、導波管 2 1 0 と比較して、さらに高周波領域においても粉体の比誘電率を測定することができる。また、実施例 3 と同様に、この実施例 4 においても、異なる粉体の比誘電率の大小を相対比較することができた。

【0163】

なお、導波管 2 3 0 を用いることにより、実施例 3, 4 と同様に、混合体 2 3 3 の比誘電率  $\epsilon$  を測定し、述した対数混合則、リヒトネッカロータの式またはウイナーの式をその実測値に適用することにより、各粉体の比誘電率を類推することができる。この導波管 2 3 0 によって得られた混合体の比誘電率を用いても、実施例 3 と同様に、異なる粉体の比誘電率の大小を比較することができる。

【0164】

本発明は、以上の構成に限定されることはなく、特許請求の範囲に記載された発明の範囲内で種々の変更が可能であり、それらも本発明の範囲内に包含されるものであることはいうまでもない。

【0165】

たとえば、上記構成においては、共振周波数、挿入損失および電力半値幅を測定するときの共振モードとして、 $TE_{011}$  モードが用いられているが、共振周波数、挿入損失および電力半値幅を測定するときの共振モードとして、 $TE_{011}$  モードを用いることは必ずしも必要でなく、 $TE_{011}$  以外の  $TE$  モードまたは  $TM$  モードを用いることもできる。

【0166】

また、上記構成においては、共振器として空洞共振器が用いられているが、共振器として空洞共振器を用いることは必ずしも必要でなく、同軸共振器や、誘電体共振器を用いることもできる。

【0167】

さらに、上記構成においては、空洞共振器が円筒状に形成されているが、空洞共振器が円筒状に形成されていることは必ずしも必要でない。

【0168】

また、上記構成においては、誘電体に混合する気体として、空気が用いられているが、誘電体に、空気を混合することは必ずしも必要でなく、アルゴンガスや窒素ガスを誘電体に混合させてもよい。

【0169】

さらに、上記構成においては、空洞共振器内の閉空間内に、空気が封入されているが、空洞共振器内の閉空間内に、空気が封入されていることは、必ずしも必要でなく、空気に代えて、空洞共振器内の閉空間内に、低損失の誘電体を充填してもよい。

【0170】

また、前記図 2 に示されている構成においては、空洞共振器内の閉空間内に、空気が封入されているが、空洞共振器内の閉空間内に空気を封入することは必ずしも必要でなく、空洞共振器の閉空間に誘電体を封入してから、空洞共振器の閉空間内を真空としてもよい。

【0171】

さらに、上記構成においては、第一の円柱体 2 8 および第一の円柱体 4 4 を固定するた

めに、ねじ 134 a、134 b が用いられているが、第一の円柱体 28 および第二の円柱体 44 を固定するために、ねじ 134、134 b を用いることは必ずしも必要ではなく、シリンダと第一の円板 26 の間に板を挿入することによって、第一の円柱体 28 を固定し、またはシリンダと第二の円板 42 の間に板を挿入することによって、第二の円柱体 44 を固定するようにしてもよい。

【0172】

また、上記構成においては、第一の円柱体 28 の先端部に、円環状の溝 32 が形成されているが、TE<sub>011</sub>モードの共振周波数とTM<sub>111</sub>モードの共振周波数が分離することができれば、第一の円柱体 28 の先端部の形状はとくに限定されるものではなく、第一の円柱体 28 の先端部に、円環状の導体板または誘電体板を取り付けてもよく、溝 32 が第一の円柱体 28 の先端部に形成されていることは必ずしも必要でない。

【0173】

さらに、上記構成においては、第一の円柱体 28 の先端部に、円環状の溝 32 が形成されているが、TE<sub>011</sub>モードの共振周波数とTM<sub>111</sub>モードの共振周波数が分離することができれば、第一の円柱体 28 の先端部に円環状の溝 32 が形成されていることは必ずしも必要でなく、第二の円柱体 44 の先端部に溝 32 が形成されていてもよく、また、第二の円柱体 44 の先端部に、円環状の導体板または誘電体板が取り付けられていてもよい。

【0174】

また、上記構成においては、ループアンテナ 124 は、第一の円板 26 および第一の円柱体 28 に形成された 2 つの貫通孔 30 a、30 b 内に挿入された、同軸ケーブル 122 の先端部に取り付けられているが、ループアンテナ 124 は、第一の円板 26 および第一の円柱体 28 側に 2 本取り付けられていることは、必ずしも必要がない。すなわち、ループアンテナ 124 は、第二の円板 42 および第二の円柱体 44 に 2 つの貫通孔を形成し、この形成された貫通孔に挿入された同軸ケーブル 122 の先端部に取り付けられてもよく、また、第一の円板 26 および第一の円柱体 28 ならびに第二の円板 42 および第二の円柱体 44 に 1 つの貫通孔を形成し、この形成された貫通孔に挿入された同軸ケーブル 122 の先端部に取り付けられてもよい。

【図面の簡単な説明】

【0175】

【図 1】本発明に係る誘電体の複素誘電率の測定装置の概略を示すブロック図である。

【図 2】本発明に係る第 1 実施形態の誘電体の複素誘電率の測定装置のブロック図である。

【図 3】空洞共振器の略斜視図である。

【図 4】図 2 に示された空洞共振器の X-X 線に沿った略断面図であり、粉体状の誘電体が配置された図である。

【図 5】図 2 に示された空洞共振器の X-X 線に沿った略断面図であり、誘電体の成形物が配置された図である。

【図 6】空洞共振器の閉空間を真空にするための真空装置を含む粉体状の誘電体の複素誘電率の測定装置を表した図である。

【図 7】本発明に係る第 2 実施形態の誘電特性測定装置 100 の構成を示すブロック図である。

【図 8】導波管の斜視図である。

【図 9】導波管の斜視図である。

【図 10】導波管の斜視図である。

【図 11】試料 A と空気とが混合した体積比率が異なる混合体の比誘電率  $\epsilon_{r2}$  を、最小二乗法により、対数混合則にフィッティングして、得られたグラフである。

【図 12】図 11 の一部拡大図である。

【図 13】試料 A と空気とが混合した体積比率が異なる混合体の比誘電率  $\epsilon_{r2}$  を、最小二乗法により、リヒトネッカロータの式にフィッティングして、得られたグラフで

ある。

【図 14】図 13 の一部拡大図である。

【図 15】試料 A と空気とが混合した体積比率が異なる混合体の比誘電率  $\epsilon_{r2}$  を、最小二乗法により、ウイナーの式にフィッティングして、得られたグラフである。

【図 16】図 15 の一部拡大図である。

【図 17】試料 A と空気とが混合した体積比率が異なる混合体の誘電正接を、混合則の式に代入し、試料 A の体積比率と、試料 A と空気とが混合した混合体の誘電正接との関係を、原点を通る直線によって近似したグラフである。

【図 18】テトラフルオロエチレン円柱の比誘電率およびシート状のテトラフルオロエチレンの比誘電率を測定した結果を示すグラフである。

【図 19】テトラフルオロエチレン円柱の誘電正接およびシート状のテトラフルオロエチレンの誘電正接を測定した結果を示すグラフである。

【図 20】複合体の比誘電率の実測値と、その実測値に対数混合則を適用した結果を示すグラフである。

【図 21】複合体の比誘電率の実測値と、その実測値にリヒトネッカロータの式を適用した結果を示すグラフである。

【図 22】複合体の比誘電率の実測値と、その実測値にウイナーの式を適用した結果を示すグラフである。

【図 23】対数混合則を適用して粉体の比誘電率を算出するために用いるグラフである。

【図 24】リヒトネッカロータの式を適用して粉体の比誘電率を算出するために用いるグラフである。

【図 25】ウイナーの式を適用して粉体の比誘電率を算出するために用いるグラフである。

【図 26】実測値に対数混合則を適用して得られた各粉体の比誘電率を示す表である。

【図 27】実測値にリヒトネッカロータの式を適用して得られた各粉体の比誘電率を示す表である。

【図 28】実測値にウイナーの式を適用して得られた各粉体の比誘電率を示す表である。

【図 29】導波管を用いて、混合体の比誘電率の周波数依存性について測定した結果である。

【図 30】異なる材料の粉体の比誘電率の大きさを相対比較した表である。

【図 31】2 種類の導波管を利用して得られた粉体の比誘電率とを比較したグラフである。

#### 【符号の説明】

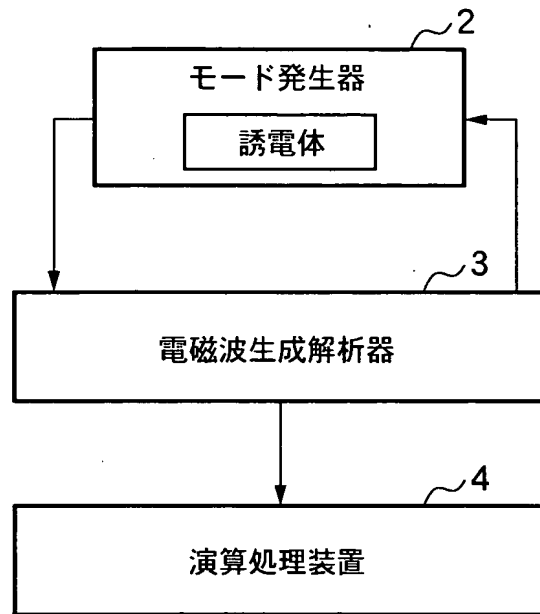
##### 【0176】

- 12 測定装置
- 14 空洞共振器
- 16 ネットワークアナライザ
- 18 演算処理装置
- 110 誘電体
- 112 空気の層
- 114 シリンダ
- 116 貫通孔
- 118 混合体の層
- 120 第一のピストン
- 122 同軸ケーブル
- 124 ループアンテナ
- 126 第一の円板

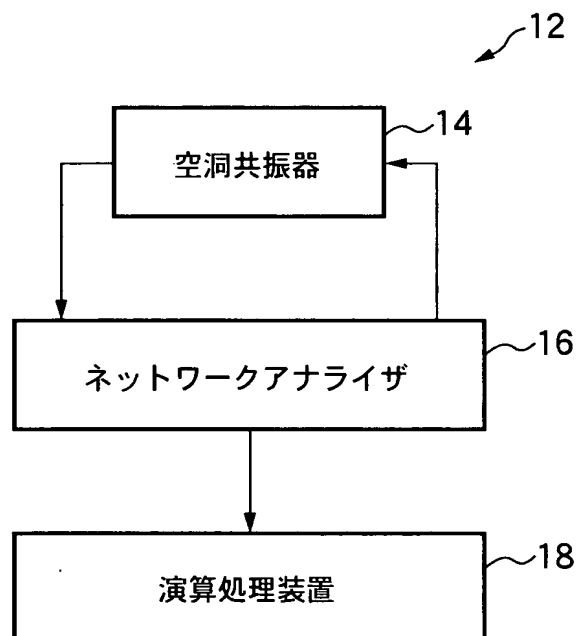


1 2 8	第一の円柱体
1 3 0 a	貫通孔
1 3 0 b	貫通孔
1 3 2	溝
1 3 4 a	ねじ
1 3 4 b	ねじ
1 3 6 a	貫通孔
1 3 6 b	貫通孔
1 4 0	第二のピストン
1 4 2	第二の円板
1 4 4	第二の円柱体
1 4 6	真空装置
1 4 8	真空ポンプ
1 5 0	真空槽

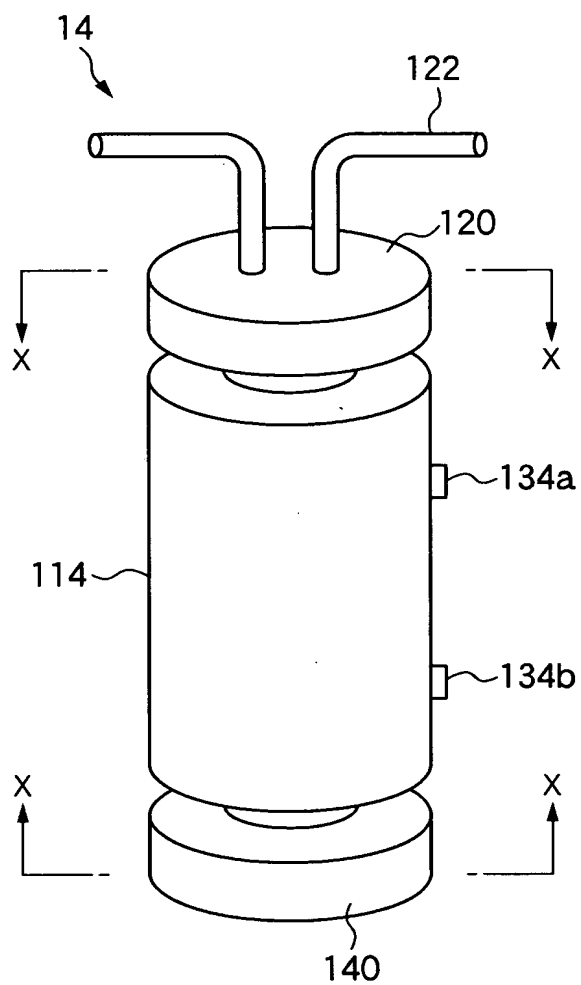
【書類名】 図面  
【図 1】



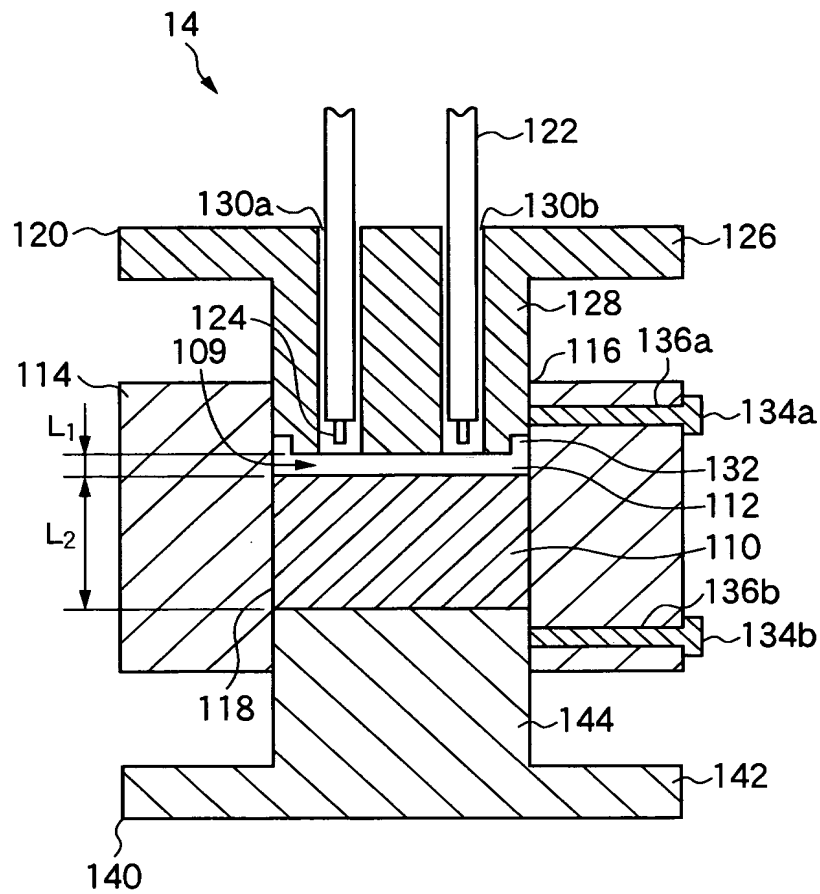
【図 2】



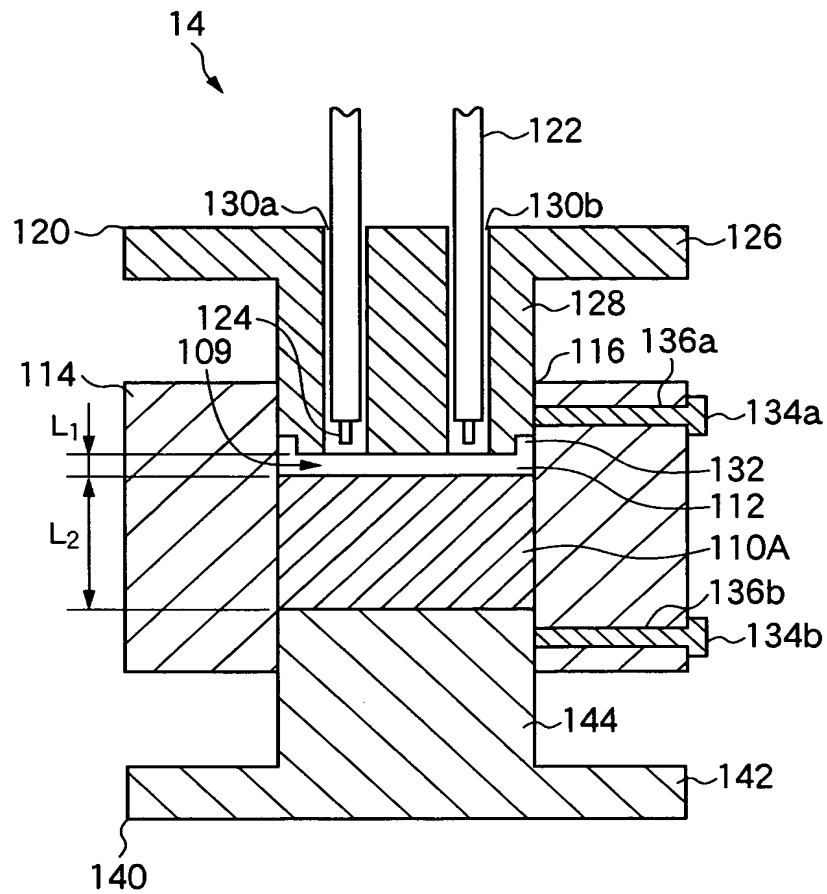
【図 3】



【図 4】

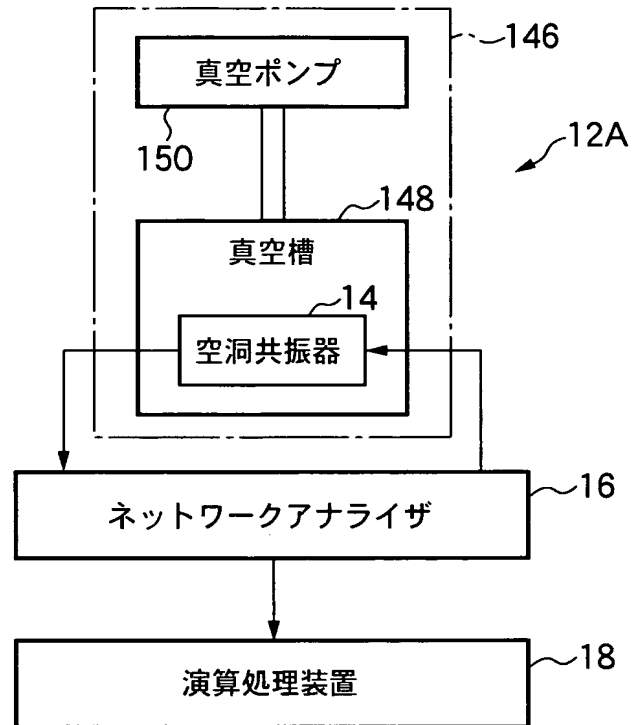


【図 5】

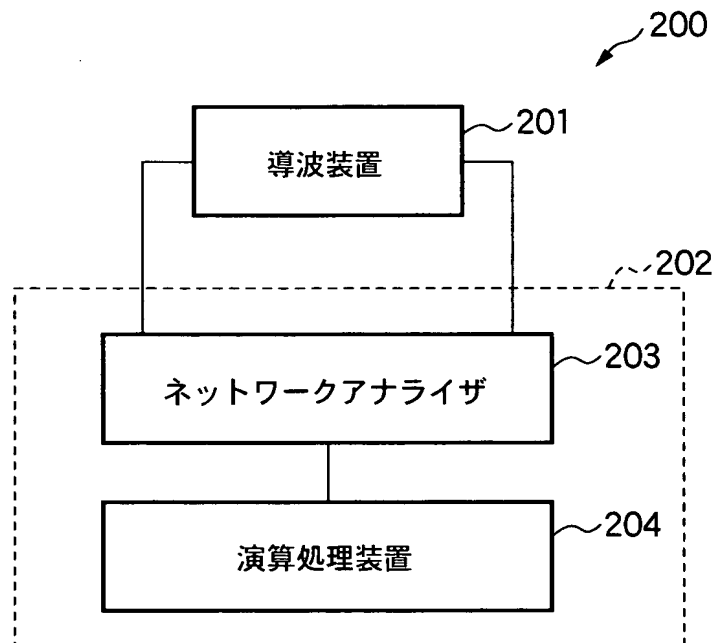


BEST AVAILABLE COPY

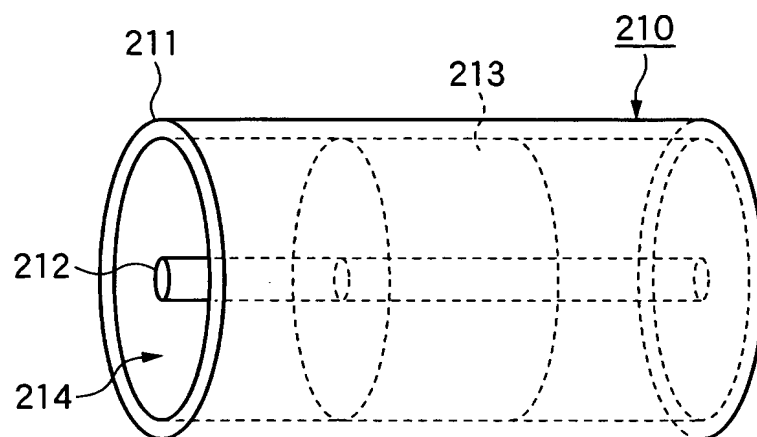
【図 6】



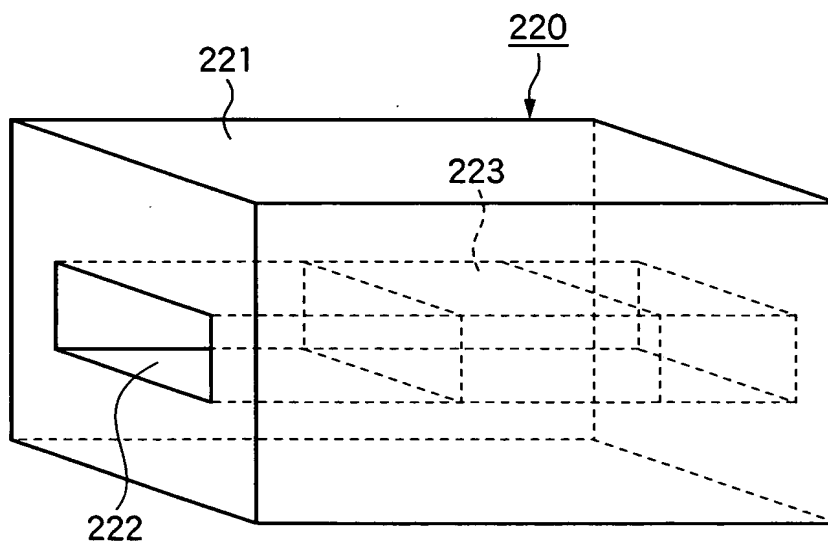
【図 7】



【図 8】

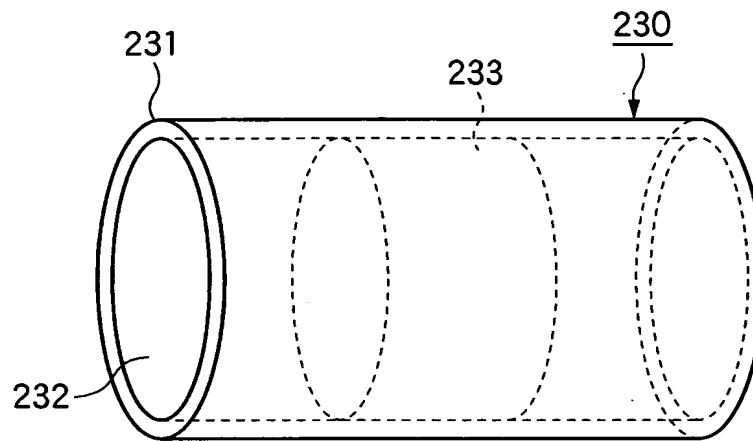


【図 9】

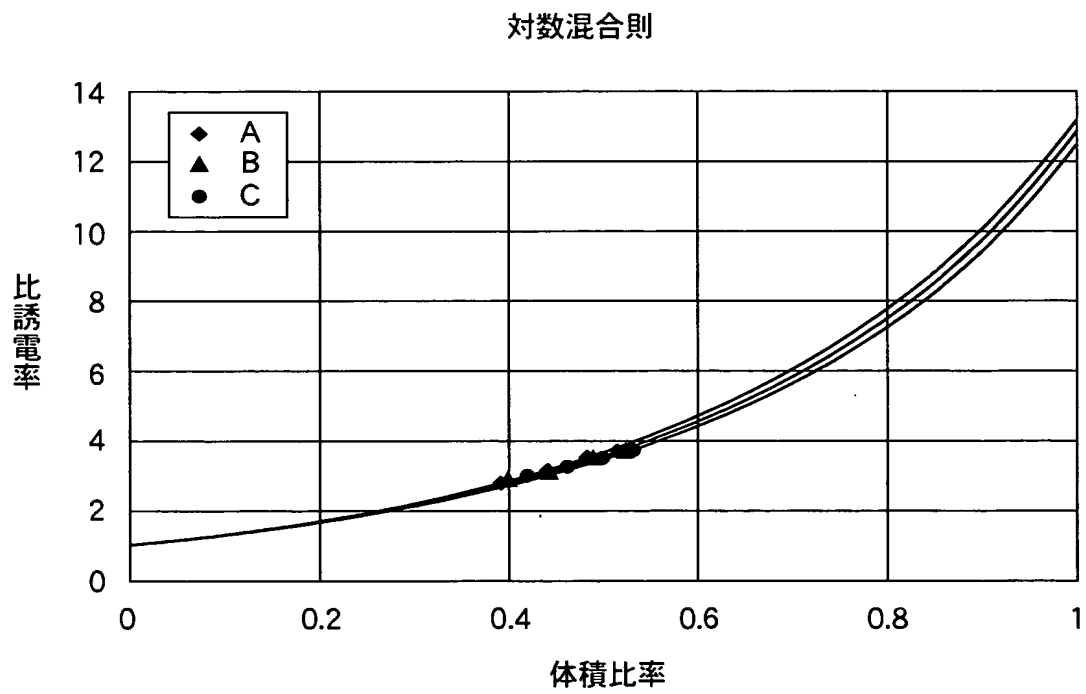


BEST AVAILABLE COPY

【図 10】



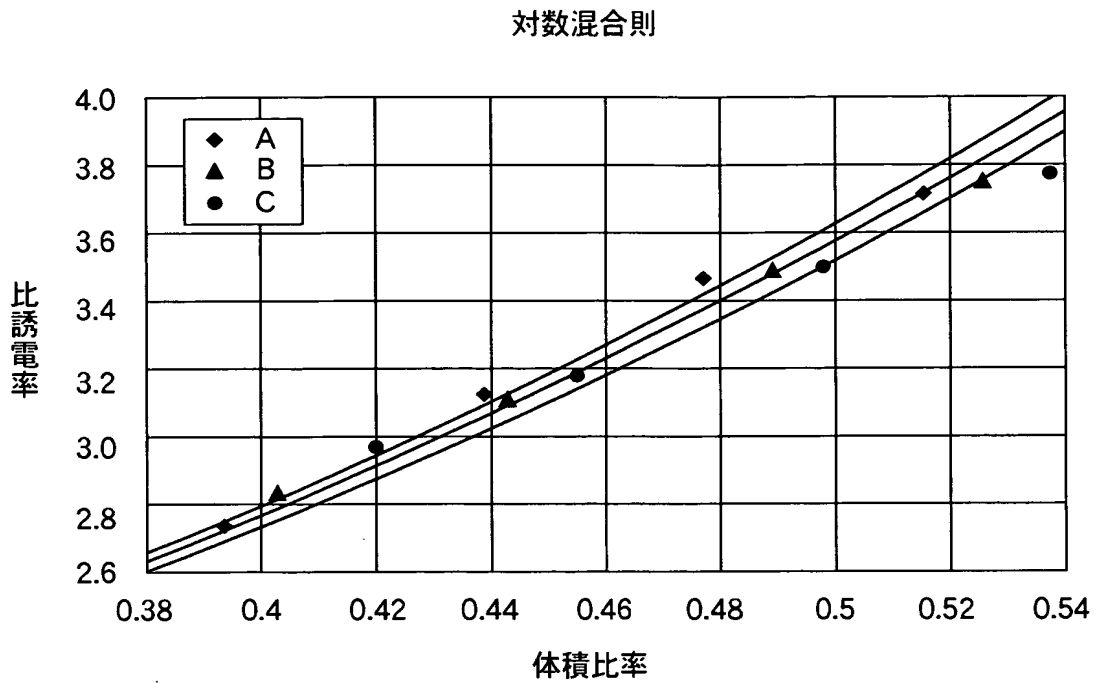
【図 11】



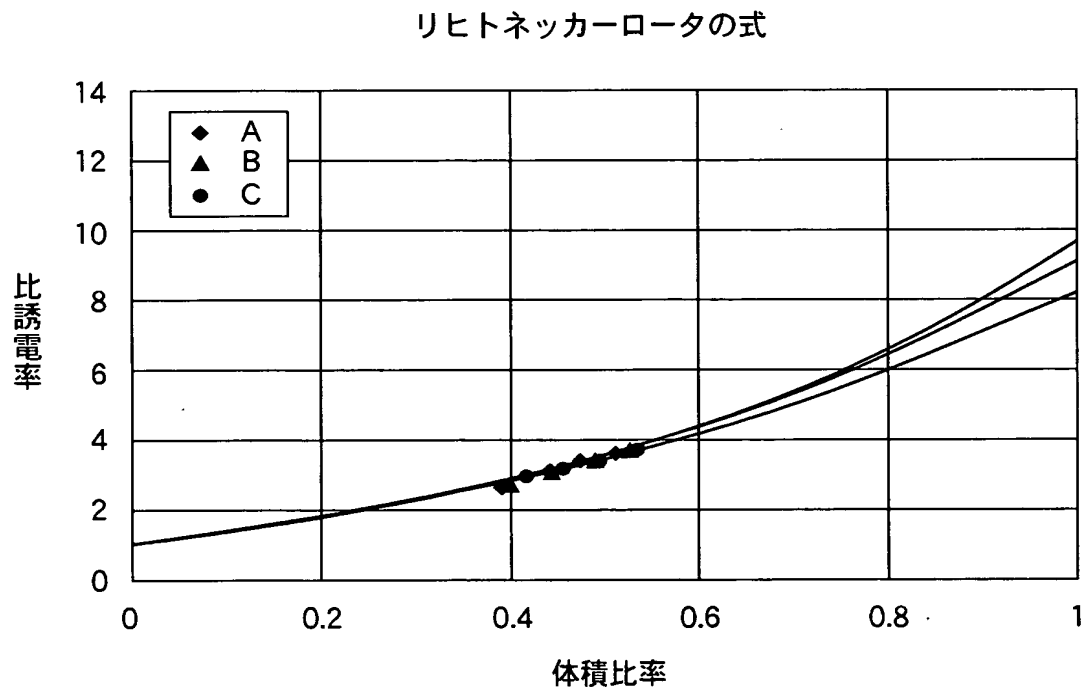
BEST AVAILABLE COPY



【図 1 2】

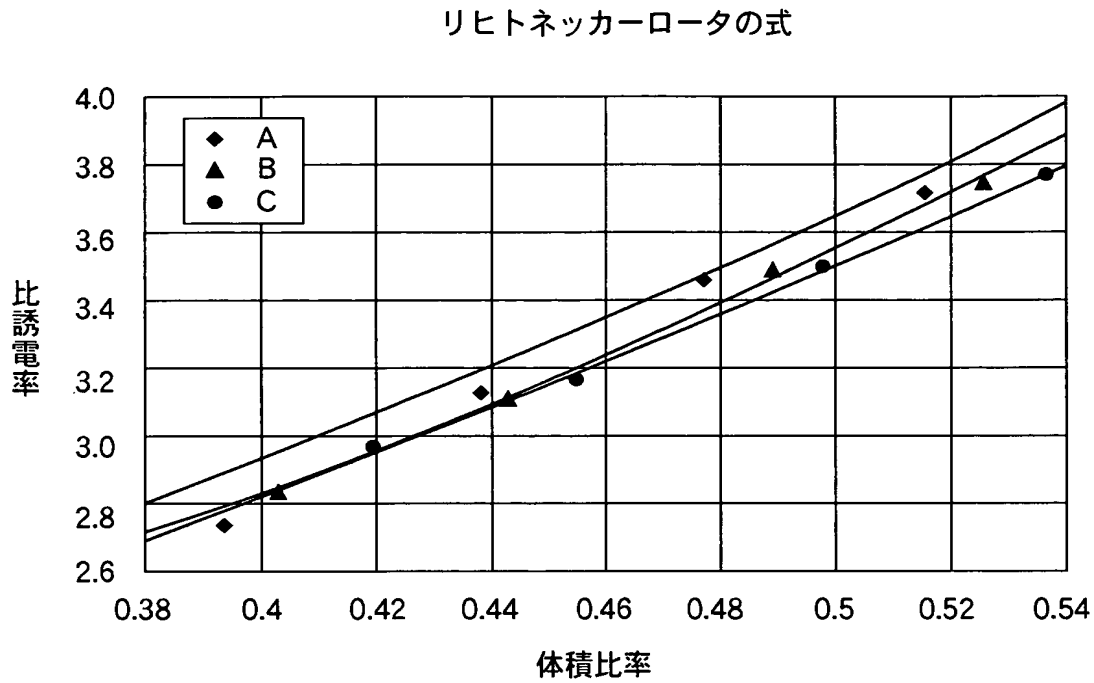


【図 1 3】

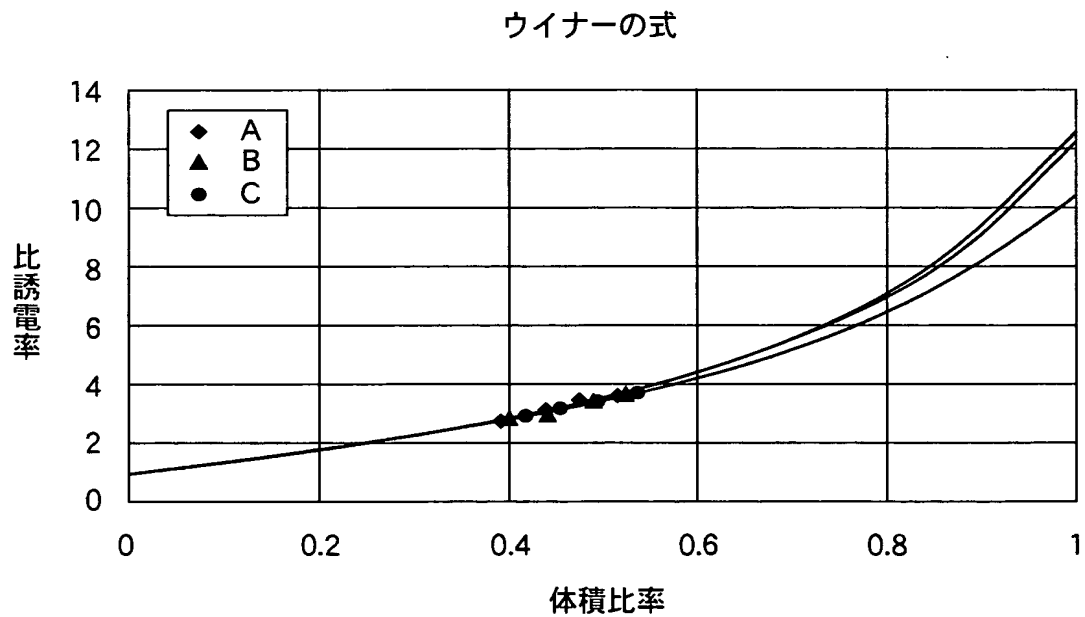


BEST AVAILABLE COPY

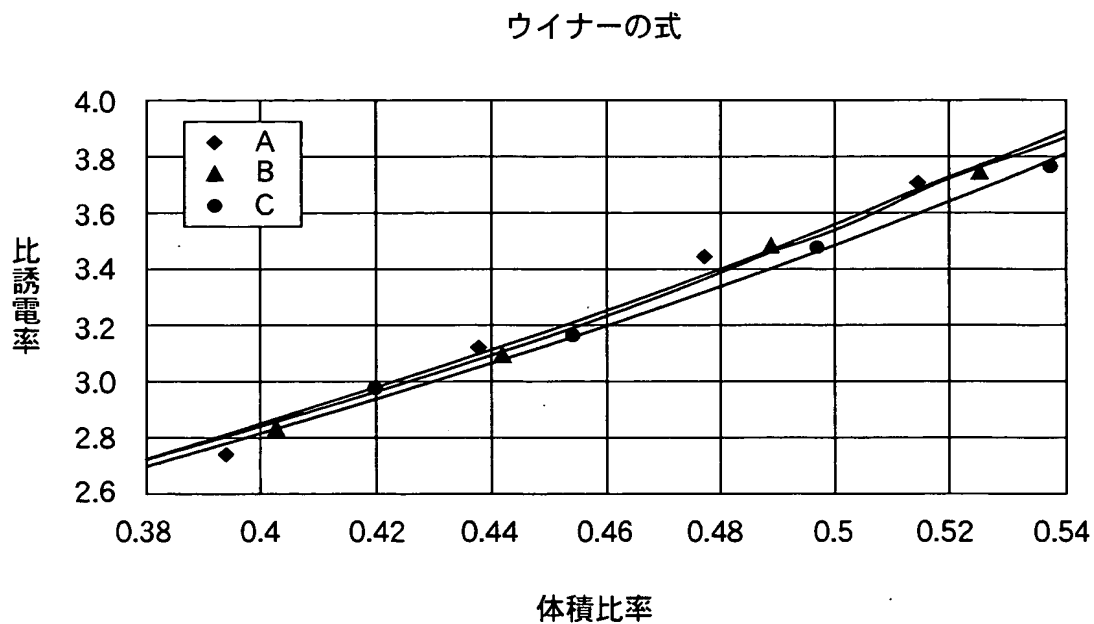
【図 14】



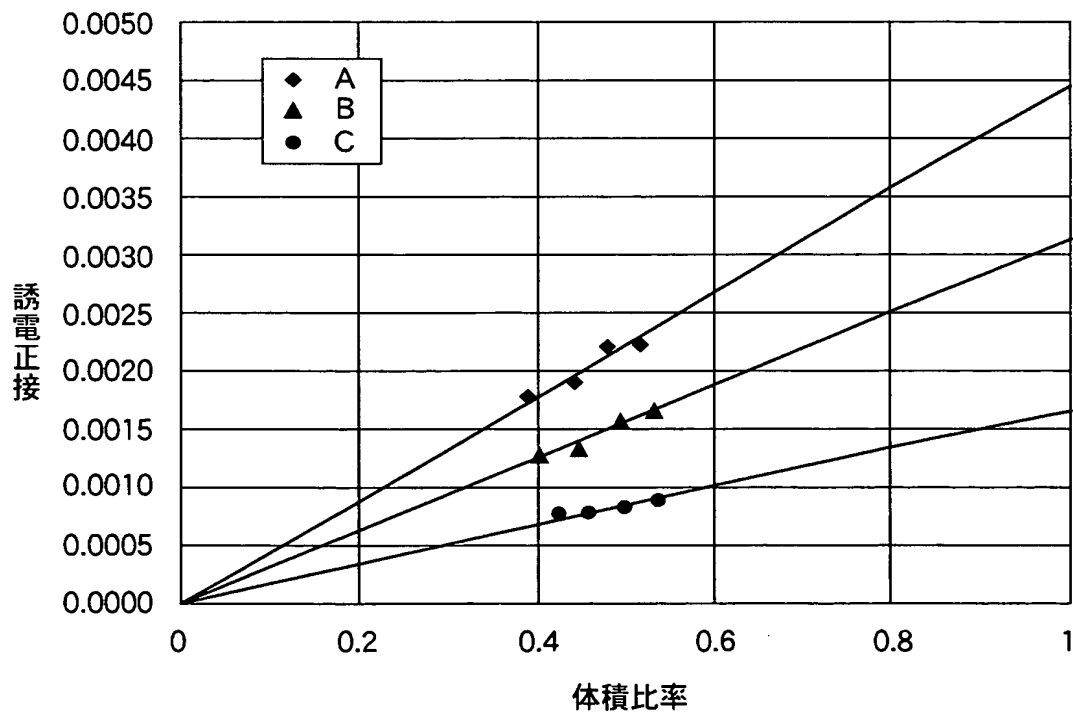
【図 15】



【図 16】

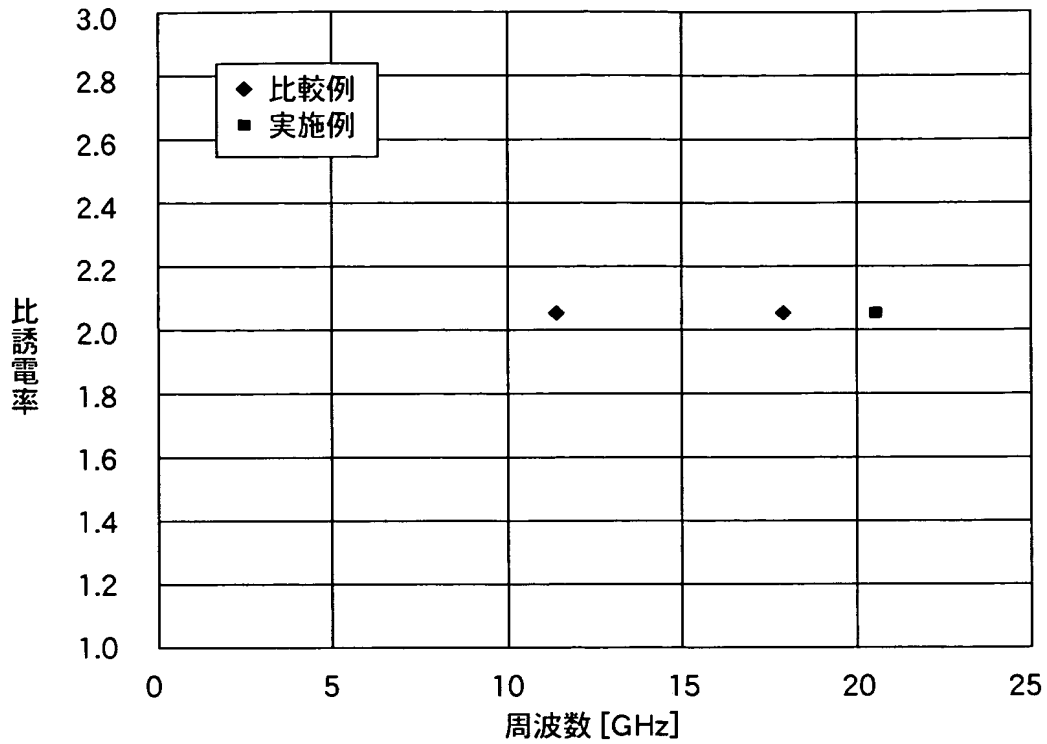


【図 17】

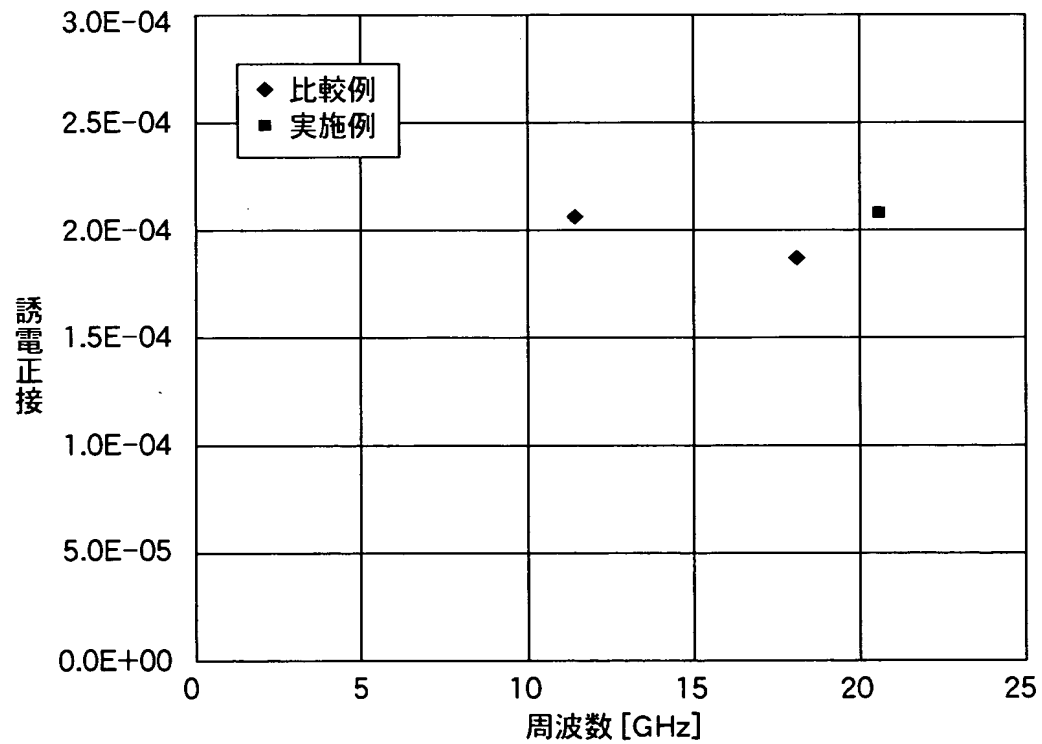


BEST AVAILABLE COPY

【図 18】

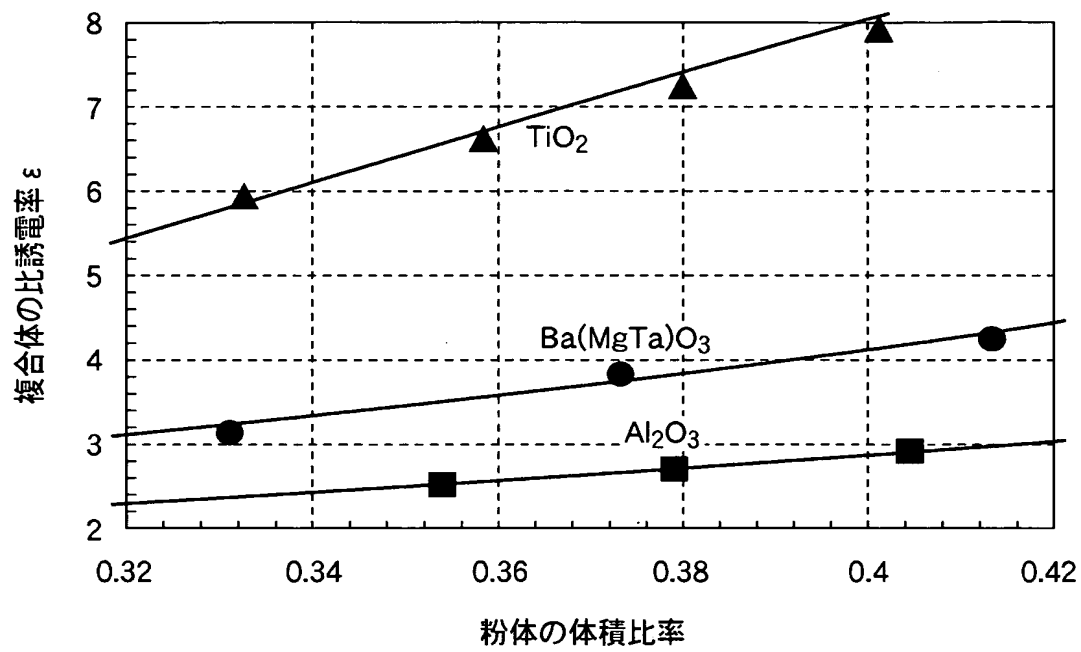


【図 19】

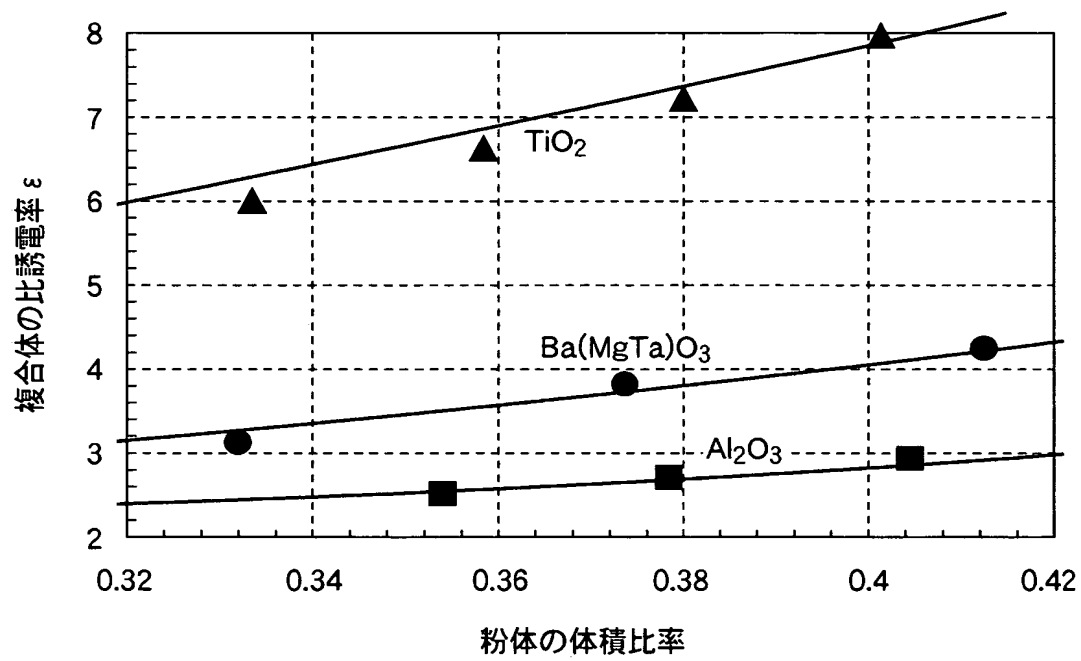


BEST AVAILABLE COPY

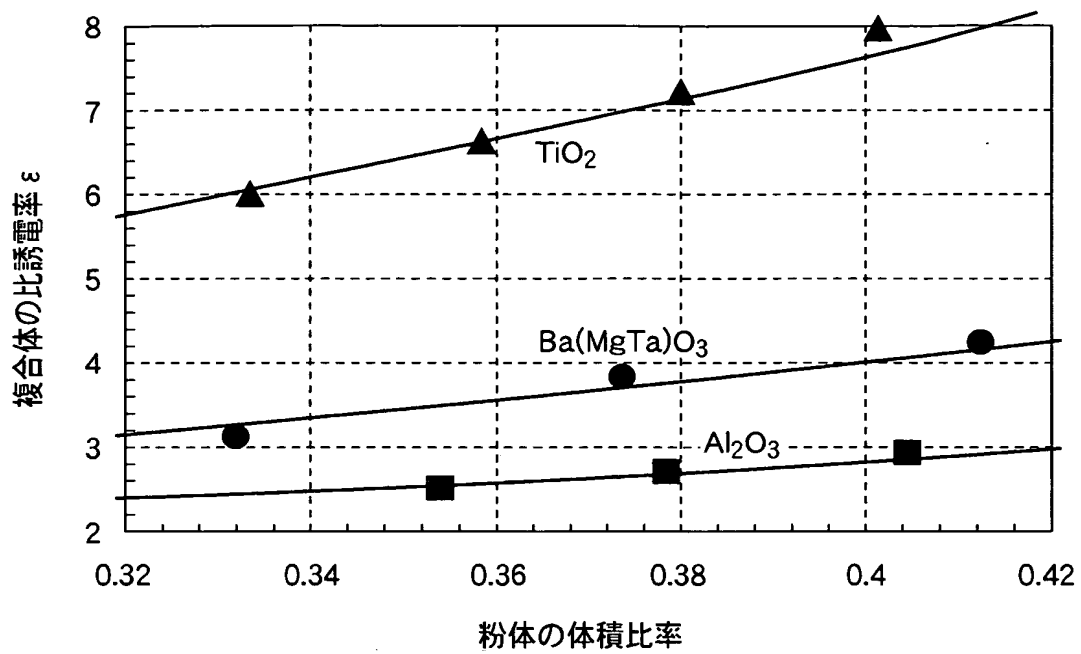
【図 20】



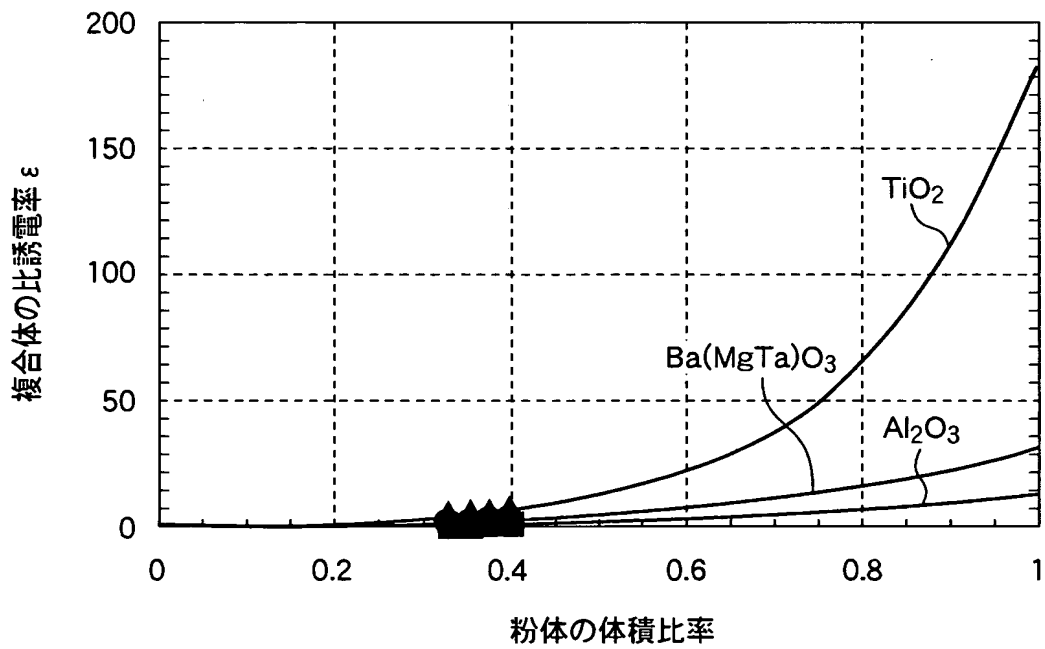
【図 21】



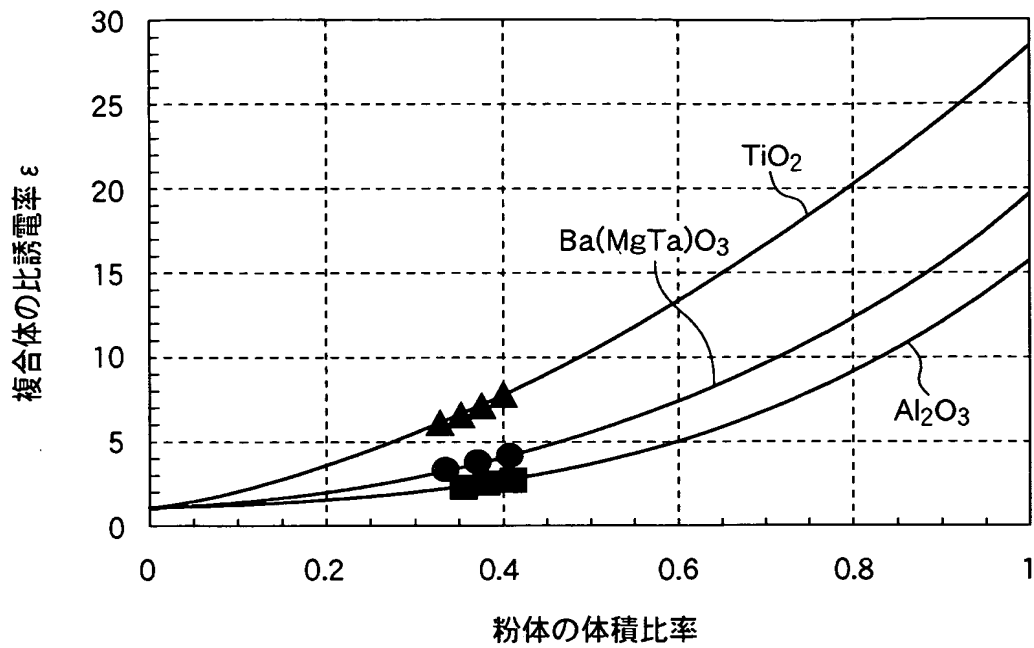
【図 2 2】



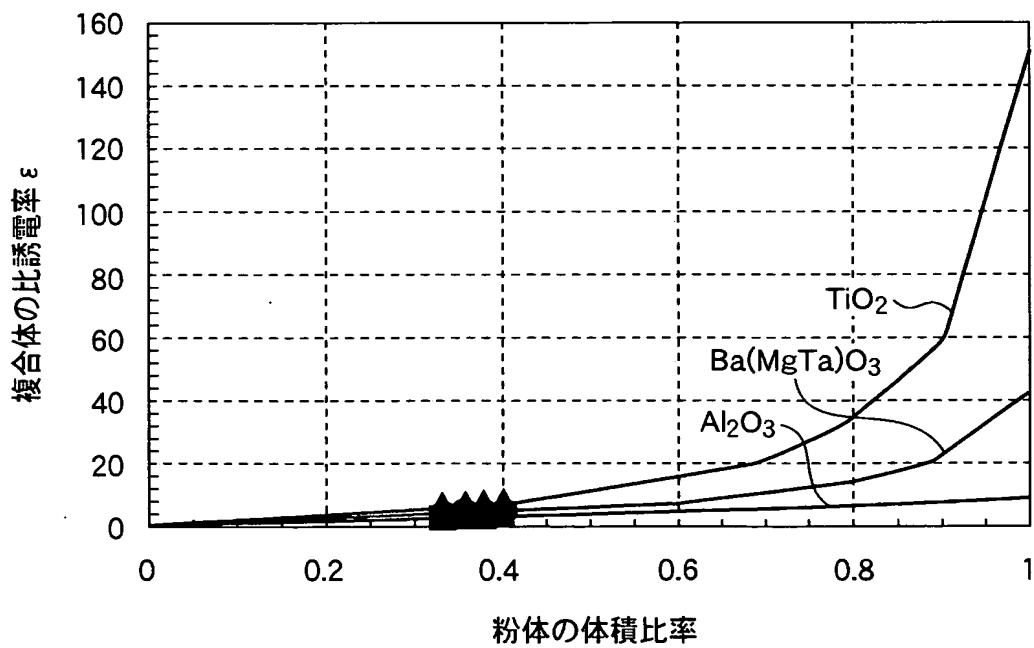
【図 2 3】



【図 24】



【図 25】



【図 2 6】

種類	焼結品の比誘電率	測定値
$\text{Al}_2\text{O}_3$	11	14.1
$\text{Ba}(\text{MgTa})\text{O}_3$	24	33.9
$\text{TiO}_2$	104	185.8

【図 2 7】

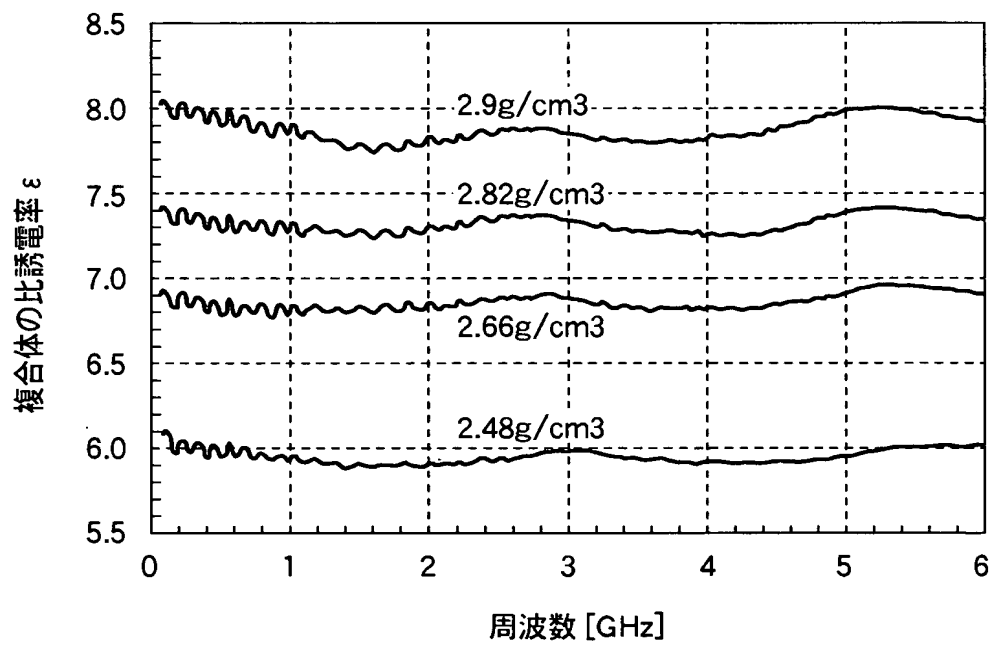
種類	焼結品の比誘電率	測定値
$\text{Al}_2\text{O}_3$	11	15.7
$\text{Ba}(\text{MgTa})\text{O}_3$	24	19.4
$\text{TiO}_2$	104	28.2



【図 28】

種類	焼結品の比誘電率	測定値
$\text{Al}_2\text{O}_3$	11	8.75
$\text{Ba}(\text{MgTa})\text{O}_3$	24	42.7
$\text{TiO}_2$	104	152.3

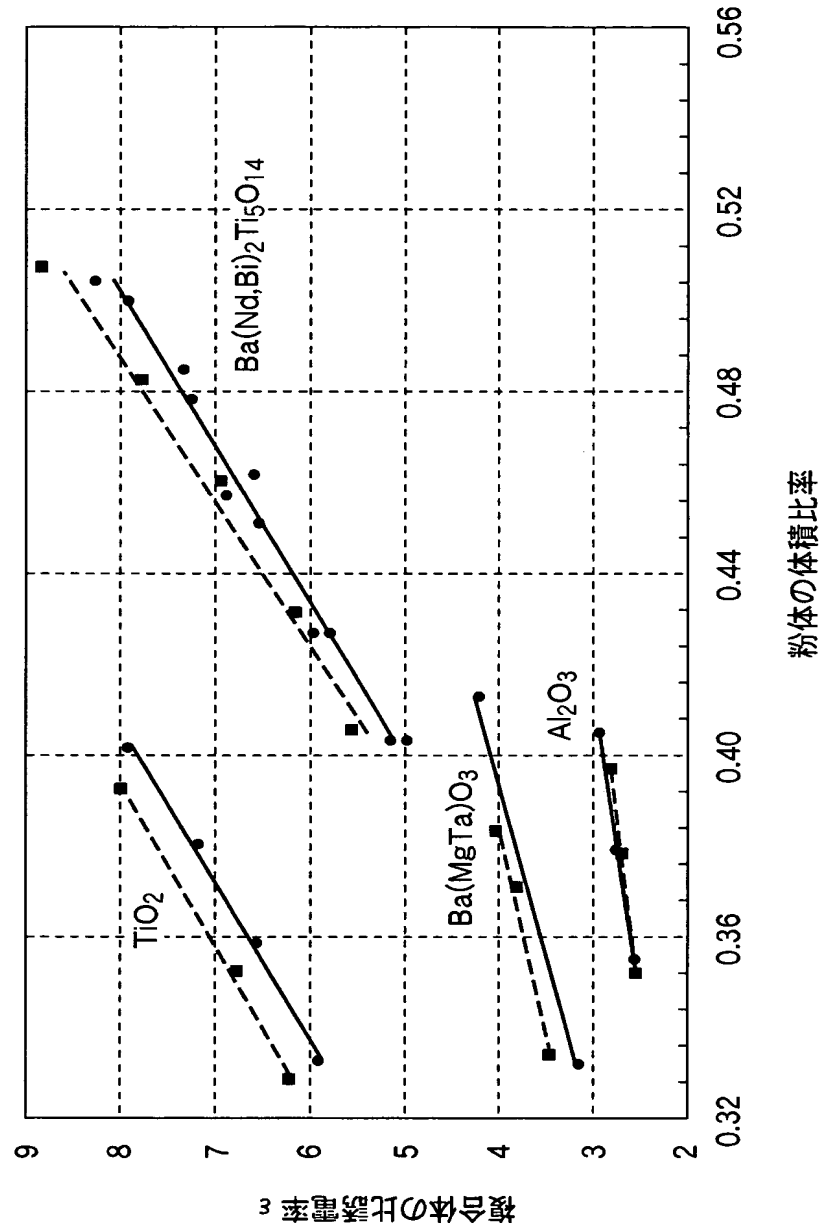
【図 29】



【図 3 0】

種類	焼結品の比誘電率	粉体の体積比が0.38のときの 混合体の比誘電率
$\text{Al}_2\text{O}_3$	11	2.7
$\text{Ba}(\text{MgTa})\text{O}_3$	24	3.8
$\text{TiO}_2$	104	7.3

【図 31】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 誘電体の複素誘電率を高い精度で測定することができる誘電体の複素誘電率の測定方法を提供することである。

【解決手段】 誘電体および気体が封入された共振器 4 に、電磁波を入力し、電磁波の入力に応答して、共振器 4 から出力された電磁波の共振モードにおける共振周波数、挿入損失および電力半値幅をネットワークアナライザ 1 6 で測定し、測定された共振周波数、挿入損失および電力半値幅から誘電体の複素誘電率を算出する。

【選択図】 図 2

特願 2 0 0 4 - 0.5 9 7 4 2

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [ 0 0 0 0 0 3 0 6 7 ]

1. 変更年月日	2 0 0 3 年 6 月 2 7 日
[変更理由]	名称変更
住 所	東京都中央区日本橋 1 丁目 1-3 番 1 号
氏 名	T D K 株式会社

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☒ FADED TEXT OR DRAWING
- ☐ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**